

Lauri Kuusisto

**JÄNNEPUNOSTEN TARTUNTA  
JÄNNITETYSSÄ BETONIRAKENTEESSA  
PUNOKSEN VAURIOITUESSA**  
Kuormituskokeet

Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Diplomityö  
Joulukuu 2019

## TIIVISTELMÄ

**LAURI KUUSISTO:** Jännepunosten tartunta jännitetyssä betonirakenteessa punoksen vaurioituessa - kuormituskokeet

Tampereen yliopisto

Diplomityö, 82 sivua

Joulukuu 2019

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennustekniikka

Tarkastaja: Professori Anssi Laaksonen

Ohjaaja: Dipl. Ins. Olli Asp

**Avainsanat:** Uudelleenankkuroituminen, tartunta, jännepunos, jänneteräs, jännitetty rakenne, betonisillat, korroosio, koekuormitus

Tämä diplomityö käsittelee jännepunosten tartuntaa ja vaurioituneen jännepunosnipun jännevoiman uudelleenankkuroitumista todellista vastaavassa jälkijännitetyssä rakenteessa. Jälkijännitetyssä ja –injektoidussa rakenteessa rakenteen toiminta muiden kuin vaurioituneen poikkileikkauksen käyttäytyminen riippuu tartunnan kyvystä uudelleenankkuroida jännepunoksen jännevoima. Jälkijännitetyissä siltarakenteissa on havaittu viime vuosina runsaasti jännepunosten korroosiovaurioita, ja jatkotutkimusten kannalta olennaista tietoa jännepunosnipun ja ympäröivän rakenteen toiminnasta jännepunoksen tai -punosten katketessa ei juurikaan ole saatavilla.

Työn tavoitteena oli määrittää uudelleenankkuroituspituus jännepunosnipun jännevoimalle ja jännevoiman jakautuminen uudelleenankkuroituspituuden matkalla todellista siltarakennetta edustavassa tilanteessa, sekä verrata tuloksia kirjallisuudessa esitetyillä laskentamenetelmillä saatuihin tuloksiin. Lisäksi koetulosten ja kokeiden aikana tehtyjen havaintojen pohjalta pyrittiin tekemään päätelmiä jännepunosten ja rakenteen yhteistoiminnasta vauriotilanteessa onnistuneessa ja vajaaksi jääneessä injektoinnissa.

Tutkimus toteutettiin koekuormituksilla. Koekappaleina oli 16 kappaletta vaihtelevan mittaista, poikkileikkaukseltaan  $400 \times 400 \text{ mm}^2$  teräsbetonipalkkia, joiden lävitse teräksiseen suojaputkeen jännitettiin ja injektointiin 12 kappaletta jännepunoksia nipussa noin 1000 MPa punosjännitykseen. Injektoinnin kovettuttua jännevoimaa vapautettiin palkin päästä punoksia vapauttamalla, jolloin jännevoima uudelleenankkuroitui palkkiin. Betonin puristumaa mitattiin palkin matkalta ja jännevoiman suuruutta palkin päästä. Tulosten perusteella tehtiin päätelmät uudelleenankkuroituspituudesta, sekä jännevoiman jakautumisesta palkin matkalla.

Tutkimuksessa määritettiin jännevoimalle uudelleenankkuroituspituus koejärjestelyn mukaisessa tilanteessa. 12 jännepunoksen uudelleenankkuroituspituus oli täydessä injektoinnissa 1000 MPa punosjännitystä kohden 1,24 m. Injektoinnin tyhjätila kasvatti uudelleenankkuroituspituutta. Jännevoiman jakautumista uudelleenankkuroituspituuden matkalla verrattiin kirjallisuudessa esitetyillä laskentamalleilla saatuihin tuloksiin, joiden huomattiin soveltuvan tarkasteluun koejärjestelyn mukaisessa tilanteessa kohtalaiseen hyvin.

## ABSTRACT

**LAURI KUUSISTO:** Bond of tendons in a prestressed concrete structure when tendons are damaged – loading tests

Tampere University

Master of Science Thesis, 82 pages

December 2019

Degree Programme in Civil Engineering

Major: Civil Engineering

Examiner: Professor Anssi Laaksonen

Supervisor: MSc. Olli Asp

**Keywords:** Reanchoring, bond, tendon, prestressingsteel, prestressed structure, concrete bridges, corrosion, loading test

This master's thesis handles the bond of prestressing tendons and the reanchoring of prestressing force in a structure that corresponds to one in a concrete bridge. In a pretensioned structure the behavior of the structure in cross sections other than the one damaged, depends on the ability of the bond to reanchor the tendon force. There have been several cases of corrosion damage to prestressing tendons in concrete bridges and information on the joint operation of the tendons and the surrounding structure needed for further study is limited.

The aim of the study was to determine reanchoring length for the tendon force of the tendon bundle and the distribution of the tendon force in reanchoring length, on a structure that corresponds to one in a concrete bridge. Results were to be compared to ones determined by mathematical models found in literature. In addition, observations made from the results and during the tests were to be used to make conclusions on the joint behavior of tendons and the surrounding structure when grouting has been successful or incomplete.

The study was carried out via loading tests. Test pieces were 16 pieces of concrete beams of various lengths and a cross-section of 400x400 mm<sup>2</sup>. Through the test beams 12 pieces of prestressing tendons were anchored to 1000 MPa of tension and the pipe was filled with injection cement. After the hardening of the injection cement, tendons were released from the end of the beam, so that the tendons were reanchored to the beam. The compression of the concrete beam was measured from the length of the beam, and tendon force was measured at the ends of the beam. Based on the results the reanchoring length and the distribution of the tendon force were concluded.

The reanchoring length of the tendons force was determined to be 1.24 m when 12 tendons of 1000 MPa of tension were released. Incomplete grouting was shown to increase reanchoring length. The distribution of tendon force was compared to one determined by mathematical models found in literature and the results were a reasonably good match in the case of this specific test arrangement.

## ALKUSANAT

Diplomityö on tehty Tampereen yliopiston Hervannan kampuksen rakennustekniikan laitoksen tutkimuslaboratoriossa.

Haluan kiittää työn tarkastajaa professori Anssi Laaksosta, työn ohjaajia diplomi-insinöörejä Olli Aspia ja Joonas Tulosta, jotka lisäksi ansiokkaasti toimivat apupoikina koekuorimitusten valmistelussa ja suorittamisessa, sekä rakennushallin henkilökuntaa avusta ja kärsivällisyydestä.

Virkistystoiminnasta kiitos Aleksin saunalle.

Tampereella, 20.12.2019

Lauri Kuusisto

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	JÄNNITETYN RAKENTEEN TOIMINTA JA SILTOJEN JÄNNEPUNOSVAURIOT .....	3
2.1	Jälkijännitetty rakenne .....	3
2.2	Jännepunosten vaurioituminen .....	3
2.2.1	Vauriomekanismit .....	4
2.2.2	Vaurioiden syyt .....	5
3.	JÄNNEPUNOSTEN TARTUNTA .....	6
3.1	Tartunnasta yleisesti .....	6
3.2	Adheesio, kitka ja mekaaninen lukittuminen .....	6
3.3	Hoyer-efekti .....	8
3.4	Tartuntalujuuden mallintaminen .....	9
4.	KUORMITUSKOKEET .....	16
4.1	Kokeiden tavoite .....	16
4.2	Koekappaleet ja tarvikkeet .....	16
4.2.1	Palkki .....	17
4.2.2	Jännitysjakkarat .....	19
4.2.3	Ankkurointilevyt ja hydraulisylinteri .....	21
4.3	Koejärjestely .....	23
4.3.1	Jännitysvaihe, ankkurointi ja injektointi .....	24
4.3.2	Vapautuskoe .....	25
4.4	Kokeiden tulokset .....	25
4.4.1	Datan käsittely .....	26
4.4.2	Kokeiden suoritus .....	30
4.4.3	Palkit 1-8 .....	31
4.4.4	Palkit 9-16 .....	47
5.	TULOSTEN ANALYSOINTI .....	64
5.1	Uudelleenankkuroituminen koetulosten perusteella .....	64
5.2	Tartunnan mallintaminen .....	71
5.3	Koetulosten vertaaminen laskennallisiin malleihin .....	76
5.4	Virhearviointi .....	77
6.	YHTEENVETO .....	80
	LÄHTEET .....	82

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

FEM	Finite element method, äärellinen elementtimenetelmä
$A_{sp}$	jännepunoksen poikkipinta-ala
$A_{sp,tot}$	jännepunosnipun poikkipinta-ala
$d_{lanka}$	langan halkaisija
$E_p$	jännepunoksen kimmokerroin
$F$	aktiivipään voima ennen lisäjännitystä
$\Delta F$	lisäjännitysvoima
$F_0$	aktiivipään voima vapautuskokeen alussa
$F_{aktiivi}$	aktiivipään voima
$F_i$	jännevoima poikkileikkauksessa i
$F_{lisä}$	lisäjännityksen kokonaisvoima
$F_{passiivi}$	passiivipään voima
$f_{bpd}$	jännepunoksen tartuntalujuuden suunnitteluvarvo
$f_c$	betonin puristuslujuus
$f_{ctd}$	betonin vetolujuuden suunnitteluvarvo
$f_{ctk}$	betonin nimellisvetolujuus
$f_{ptd}$	jännepunoksen suunnittelulujuus
$f_{ptk}$	jännepunoksen nimellislujuus
$k_{voima}$	jännitysjakkaran voimakkeroin
$l_{bp}$	jännepunoksen tartuntapituuden perusarvo
$l_{bpt}$	jännepunoksen ankkuroitumis pituus
$l_{bp,\Delta\sigma}$	tartuntapituus lisäjännitykselle
$\Delta P$	ankkuroitumishäviöitä kompensoiva lisäjännevoima
$P_0$	ankkurointivoima
$p$	jännepunoksen tartuntapiiri
$p_{tot}$	jännepunosnipun tartuntapiiri
$\alpha_{p1}$	vapautuksen huomioonottava kerroin
$\alpha_{p2}$	reaktiovoimien vaikutuksen huomioiva kerroin
$\alpha_{p3}$	tartuntatyypin huomioiva kerroin
$\gamma_c$	betonin materiaalin osavarmuuskerroin
$\gamma_s$	teräksen materiaalin osavarmuuskerroin
$\delta$	liukuma
$\delta_i$	punosrajapinnan liukuma poikkileikkauksessa i
$\epsilon_0$	puristuman alkuarvo
$\epsilon_F$	voima-anturin puristuma
$\epsilon_f$	puristuman loppuarvo
$\epsilon_i$	jännepunosten venymä poikkileikkauksessa i
$\epsilon_n$	puristuma
$\epsilon_{n,s}$	puristuman suhteutettu ja siirretty arvo
$\eta_1$	tartuntapituuden raja-arvokerroin, ylä- ja alaraja, sekä keskiarvo
$\eta_2$	punoksen halkaisijasta riippuva kokeellinen vakio
$\eta_3$	punoksen halkaisijasta riippuva kokeellinen vakio
$\eta_{p1}$	punostyyppin huomioonottava kerroin
$\eta_{p2}$	punoksen sijainnin huomioonottava kerroin

$\theta_p$	jännepunoksen nimellishalkaisija
$\Delta\sigma_i$	punosjännityksen muutos poikkileikkauksessa i
$\Delta\sigma_p$	punosjännityksen muutos
$\sigma_p^i$	punosjännitys ennen vapautusta
$\tau_b$	tartuntajännitys
$\tau_{b,i}$	tartuntajännitys poikkileikkauksessa i
$\phi$	jännepunoksen nimellishalkaisija
$\phi_{eq}$	jännepunosnipun ekvivalentti halkaisija

# 1. JOHDANTO

Suomessa sijaitsevista pitkän jännevälän siltarakenteista suuri osa on toteutettu jännitetynä rakenteena. Jännitetyn rakenteen toiminnalle olennaista on jännevoiman poikkileikkausta puristava vaikutus. Olemassa olevissa siltarakenteissa on kuitenkin havaittu vaurioita. Yleinen vauriotapaus on jännepunosten altistuminen korroosiolle ja siitä aiheutunut poikkileikkauksen pieneneminen, mikä johtaa pahimmillaan jännepunoksen/jännepunosten katkeamiseen. Jännepunoksen katketessa jälkijännitetyssä ja injektoidussa rakenteessa rakenteen toiminta muissa poikkileikkauksissa riippuu jännepunoksen uudelleenankkuroitumisesta ja tartunnan kyvystä kehittää jännevoima uudelleenankkuroitumispituuden matkalla.

Yksittäisten jännepunosten tartunta- ja uudelleenankkuroitumiskäyttäytymistä betonissa on tutkittu paljon esimerkiksi ontelolaattateollisuuden tarpeisiin. Tilanne kuitenkin poikkeaa huomattavasti siltarakenteista, joissa jännepunokset sijoitetaan sementti-injektoituihin suojaputkiin usean punoksen nipuissa. Tutkimusten pohjalta kehitettyjen, kirjallisuudessa esitettyjen laskentakaavojen ja -mallien soveltuvuudesta tällaiseen tilanteeseen on tietoa vähän.

Tässä työssä tutkitaan jännepunosnipun uudelleenankkuroitumis- ja tartentakäyttäytymistä kokeellisesti. Tavoitteena on määrittää jännepunosnipun jännevoiman uudelleenankkuroitumispituus tavallista siltarakennetta edustavassa tilanteessa ja verrata arvoja kirjallisuudessa esitetyillä menetelmillä määritettyihin laskennallisiin arvoihin. Tällä tavoin pyritään saamaan tietoa rakenteen toiminnasta jatkotutkimuksia varten.

Kokeissa jälkijännitettyjä, teräsbetonisia koepalkkeja kuormitettiin vapauttamalla jännepunoksia palkin toisesta päästä. Palkkien sisälle valettiin teräksinen suojaputki, jonka sisälle asetettiin 12 kappaletta jännepunoksia. Jännepunokset jännitettiin ja ankkuroitiin palkin päihin, minkä jälkeen suojaputki injektointiin sementillä. Tuloksena oli keskeisesti jännevoiman puristama palkki. Injektoinnin kovettuttua jännepunoksia vapautettiin palkin toisesta päästä, jolloin vapautuneiden punosten jännevoima uudelleenankkuroitui injektointisementin tartunnan välityksellä. Tämä puristavan jännevoiman kehittyminen voitiin mitata palkin matkalla puristuman muutoksena, minkä perusteella pystyttiin määrittämään jännepunoksen uudelleenankkuroitumispituus. Onnistuneen, täyden injektoinnin lisäksi tutkittiin tapausta, jossa injektointi oli jäänyt vajaaksi. Tämä toteutettiin asentamalla koepalkkeihin suojaputken yläpintaan eristemuovinen soiro estämään putken täyttyminen injektiosementillä.



Koekuormituksissa oli haasteita, mikä vähensi vertailukelpoisten tulosten määrää. Uudelleenankkuroitumispituudeksi saatiin kuitenkin 5 koetuloksen perusteella keskimäärin 1239 mm 1000 MPa:n punosjännitystä kohden, kun kaikki 12 jännepunosta oli vapautettu. Laskennallisiin, vastaavan tilanteen tuloksiin verrattuna ero oli noin  $\pm 10$  % riippuen laskentamallista. Vajaan injektoinnin koetuloksista määritettiin uudelleenankkurointipituuden kasvavan noin 65 % täyden ja vajaan injektoinnin välillä, putken yläpinnassa olevan tyhjätilan ollessa 20 mm korkea. Tämä korostaa injektoinnin onnistumisen tärkeyttä.

Pienestä koemäärästä ja erittäin spesifioidusta koejärjestelystä johtuen koetuloksista ei voi tehdä yleistettyjä päätelmiä. Muuttujina kokeissa ei esimerkiksi ollut injektiosementin lujuus vapautushetkellä, tai miten uudelleenankkuroitumispituus kehittyy pitkällä aikavälillä. Lisäksi kokeissa oli monia, vaikeasti määritettäviä tai hallittavia virhelähteitä, joten tuloksiin liittyy runsaasti epävarmuutta. Kuitenkin, tulokset antavat tukea laskentamenetelmien käyttämiselle ainakin koejärjestelyn mukaisessa tilanteessa.

## 2. JÄNNITETYN RAKENTEEN TOIMINTA JA SILTOJEN JÄNTEIDEN VAURIOT

### 2.1 Jälkijännitetty rakenne

Rakenteen jännittämisellä pyritään suunnittelussa kumoamaan rakenteeseen kohdistuvia ulkoisten kuormien vaikutuksia. Betonilla on tunnetusti hyvä puristuskestävyys, mutta huono vetokestävyys. Tämän vuoksi taivutetun betonipoikkileikkauksen vedetty pinta yleensä halkeilee, eikä toimi kuormaa vastaanottavana osana. Vetojännitys joudutaan vastaanottamaan raudoituksella ja rakenteen jäykkyys on halkeilematonta huomattavasti pienempi. Jännepunoksien aiheuttamalla puristuksella saadaan aikaiseksi käyttörajatilassa yleensä vetojännityksetön, kokonaan puristettu betonipoikkileikkaus. Tällöin koko betonipoikkileikkaus toimii kimmoisesti ja tuloksena on jännittämätöntä poikkileikkausta jäykempi rakenne sekä pienemmät käyttörajatilan muodonmuutokset. Murtorajatilassa jännepunokset toimivat vetoraudoituksena ja jännitetty rakenne toimii kuten jännittämätönkin.

Vetojännityksetön poikkileikkaus tarkoittaa lisäksi sitä, että rakenteeseen käyttöiän aikana mahdollisesti muodostuneet hetkelliset halkeamat puristuvat kasaan. On yleisesti tiedossa, että halkeamat altistavat rakennetta ympäristövaikutuksille. Betonin halkeamien kautta raudoitukseen pääsee kosteutta ja mahdollisesti sulfaatteja ja klorideja. Lisäksi halkeamat tehostavat hiilidioksidin kulkeutumista syvemmälle rakenteeseen. Hiilidioksidi aiheuttaa betonin karbonatisoitumista ja siten heikkenemistä. Karbonatisoituminen laskee myös betonin pH:ta, mikä puolestaan heikentää betonin alkalisuuden raudoitusta korroosiolta suojaavaa vaikutusta.

### 2.2 Jännepunosten vaurioituminen

Jännepunoksen katketessa rakennetta puristava jännevoima putoaa kyseisessä poikkileikkauksessa punoksen voimaa vastaavan määrän. Tämä johtaa rakenteen puristuman pienemiseen, jolloin riippuen jännevoiman menetyksen suuruudesta rakenteen jäykkyys saattaa pienentyä ja käyttörajatilan muodonmuutokset saattavat kasvaa. Murtorajatilassa pienentynyt jännepunosmäärä pienentää poikkileikkauksen taivutusmomenttikapasiteettia ja tukien läheisyydessä puristuksen pienentyminen johtaa poikkileikkauksen leikkausvoimakapasiteetin pienentymiseen.

Pienentynyt puristus altistaa poikkileikkauksen halkeilulle ja jo syntyneiden halkeamien uudelleenavautumiselle suunniteltua pienemmillä kuormatasoilla. Yhden jännepunoksen katkeamisen vaikutus riippuu jännepunosten kokonaismäärästä. Suuremmissa rakenteissa

vaikutus saattaa olla hyvin pieni, mutta pienemmissä katkennut jännepunos saattaa olla esimerkiksi yksi kahdestakymmenestä jolloin jännevoima pienenee 5 %.

Jälkijännitettyjen ja –injektoitujen rakenteiden erityisongelmana ovat injektointivalun tyhjätilat ja sen vaikutukset korroosioilmiöihin. Tyhjätilat mahdollistavat suotuisat olosuhteet korroosiolle ja jännepunoksen katketessa heikentävät tai jopa estävät täysin jännepunosten uudelleenankkuroitumisen tyhjätilan alueella.

## 2.2.1 Vauriomekanismit

Tavallinen jännitetyn rakenteen sisäinen vaurio on jännepunosten katkeaminen korroosiosta aiheutuvasta poikkileikkauksen pienenemisestä. Normaalisti teräsbetonirakenteen teräkset ovat suojattuna korroosiolta betonin alkalisuuden ansiosta ( $\text{pH} > 12 \dots 13$ ). Teräksen pinnalle muodostuu alkalisuuden seurauksena suojaava, tiheä passivoitunut kerros. Betonin karbonatisoituminen hiilidioksidin vaikutuksesta laskee sen alkalisuutta, ja pH:n laskeminen jo arvoon 11,5 mahdollistaa korroosion käynnistymisen. pH:n laskiessa alle 9:n passiivikerros liukenee kokonaan eikä suojaavaa vaikutusta enää ole. [5]

Betonin karbonatisoituminen etenee pinnasta syvemmälle rakenteeseen hiilidioksidin diffuusion myötä. Karbonatisoituminen on kuitenkin hidasta moderneissa silta- ja muissa rakenteissa matalien vesi-sementtisuhteiden ja tiiviin betonin ansiosta. Lisäksi jännepunosten kulku on jälkijännitetyissä rakenteissa yleensä syvällä betonirakenteessa injektio-laastilla täytetyissä suojaputkissa. Tämän vuoksi karbonatisoitumisen etenemisen aiheuttama laajamittaista korroosiota voidaan pitää epätodennäköisenä. Toisaalta, siltarakenteet ovat alttiina toistuville kastumis-kuivumissykleille jotka kiihdyttävät karbonatisoitumista edistämällä hiilidioksidin diffuusiota ja tarjoamalla karbonatisoitumisreaktioon tarvittavan veden johon hiilidioksidi liukenee. [5][1]

Teräksen kanssa kontaktiin päässeet kloridi-ionit auttavat liuottamaan terästä suojaavan passiivikerroksen ja mahdollistavat korroosion nopean etenemisen ilman betonin alkalisuuden alenemista. Kloridi-ionit toimivat katalyyttinä eivätkä siten kulu reaktiossa, mikä tekee kloridien vaikutuksen torjumisesta hankalaa. Tehokkain tapa ehkäistä kloridien aiheuttamaa korroosiota on estää kloridien liiallisen pääsyn kontaktiin terästen kanssa. Kloridit aiheuttavat teräksen voimakasta paikallista syöpymistä ja poikkipinta-alan pienenemistä. Kuoppakorroosion nopeus saattaa olla jopa 1 mm/vuosi. [5][1]

Jännepunosten jatkuvasta korkeasta jännitystilasta johtuen niiden korroosioon liittyvät korostetusti erilaiset jännityskorroosimuodot, joille on ominaista lankojen säröily. Säröily pienentää paikallisesti langan poikkipinta-alaa, jolloin ehjien lankojen jännitykset kasvavat, mikä puolestaan johtaa säröjen ja korroosion etenemiseen. Jännityskorroosioon liittyy usein vetyhaurastuminen, sekä vedyn aiheuttama jännityskorroosiosäröily. Yleisesti voidaan sanoa teräksen herkkyyden näille ilmiöille kasvavan lujuuden kasvaessa. [5]

### 2.2.2 Vaurioiden syyt

Vesivuodot aiheuttavat varsinkin paikallisesti voimakkaita korroosiovaurioita. Vuotovedet kuljettavat mukanaan klorideja rakenteen sisälle jolloin vuotokohdan läheisyydessä tapahtuu voimakasta kloridikorroosiota. Jälki-injektoidut jännekulut ovat pääsääntöisesti hyvässä suojassa vuotovesiltä ja muilta ympäristövaikutuksilta suojaputkissa. Teräksinen suojaputki on kuitenkin altis korroosiolle ja saattaa syöpyä puhki, jolloin jännepunokset pääsevät altistumaan ympäristövaikutuksille puhkeamiskohdista.

Ankkurialueet ovat jälki-injektoitujen rakenteiden heikko kohta. Voimakkaiden mekaanisten rasitusten vuoksi ympäristövaikutukset pääsevät vaikuttamaan syvemmälle rakenteeseen halkeamia pitkin. Ankkureiden jälkivaluissa tapahtuu myös paljon työvirheitä ahtaisten ja hankalien sijaintien vuoksi. Lisäksi laastin tai betonin laatu voi olla puutteellista jolloin suojavaikutus ei välttämättä ole riittävä.

Valun aikana saattaa suojaputkeen vuotaa betonimassasta erottunutta vettä. Vesi kerääntyy suojaputken notkokohtiin, missä sen emäksisyys häviää nopeasti karbonatisoitumisen seurauksena. Lisäksi vesi sisältää liuenneita suoloja, sulfaatteja ja klorideja. Vielä jännittämättömät jänneteräokset altistuvat voimakkaasti korroosioilmiöille vuotovedessä ollessaan. Tällaisen korroosion vakavuutta lisää se, että vaikutukset rajoittuvat jännekulkujen notkokohtiin, jolloin samalla alueella tapahtuu paljon paikallista vaurioitumista ja rakenteen turvallisuus heikkenee. [5]

Injektoinnin työvirheistä suojaputkeen aiheutuu tyhjätiloja joissa jänneterästen korroosiosuoja ja tartunta ovat huonompia. Ongelmat saattavat johtua injektointimassan ominaisuuksista. Massa saattaa erottua suojaputkessa, olla liian jäykkää, tiivistymisestä aiheutua putken vajaatäyttöä tai massa virrata liiallisesti väärään suuntaan. Myös suojaputken liian pieni kaarevuussäde, tukkeutuminen tai litistyminen, venttiilien väärä sijainti sekä liian pieni tai suuri putki punosten määrään nähden saattavat aiheuttaa injektoinnin epäonnistumisen.

### 3. JÄNNEPUNOSTEN TARTUNTA

#### 3.1 Tartunnasta yleisesti

Jännepunoksen katketessa, punoksen ja rakenteen toiminta suunnitellulla tavalla muissa poikkileikkauksissa riippuu sen tartunnasta. Tartunta pyrkii estämään jännepunoksen palautumisen jännittämättömään pituuteensa. Tämä estynyt muodonmuutos (uudelleenankkuroituminen) palauttaa esijännitysvoiman uudelleenankkuroitumispituuden matkalla. Tällöin jännevoiman on mahdollista toimia muissa poikkileikkauksissa vaurioalueen ulkopuolella. Vastaavasti jänneteräksen on mahdollista toimia osana poikkileikkausta, esimerkiksi murtorajatilassa, kun tartunta on kehittynyt.

Jännepunoksen tartunta tapahtuu adheesion, kitkan, mekaanisen lukittumisen ja Hoyer-efektin kautta. Jälkijännitettyjen rakenteiden kohdalla ankkurointikykyä tarvitaan varsinaisesti vasta jännepunoksen vauriotilanteessa murtorajatilassa. Kuitenkin, ulkoisten kuormien vaikuttaessa jännepunokset pyrkivät venymään, jolloin kitka, adheesio ja mekaaninen lukittuminen välittävät kuorman ympäröivään rakenteeseen ja palkkiteorian oletuksena oleva ehto tasojen säilymisestä tasoina täyttyy. Jännepunosten venymän kasvaessa niiden halkaisija pienenee jolloin kontakti ympäröivään injektointimassaan saattaa heikentyä (ks. Kappale 3.3 Hoyer-efekti).

Ankkurointipituuden laskennan kaavat on kehitetty yksittäiselle punokselle betonissa. Jännepunosten, injektiomassan ja suojaputken yhteistoiminnan vaikutusta ankkurointipituuteen ei tunneta, eivätkä kirjallisuudessa esitetyt kaavat välttämättä sovellu sen laskeamiseen.

#### 3.2 Adheesio, kitka ja mekaaninen lukittuminen

##### *Adheesio*

Adheesiolla tarkoitetaan jännepunoksen ympärillä olevan sementtimäisen kerroksen muodonmuutoksista aiheutuvaa elastista sidosta. Se koostuu kemiallisesta ja fyysisestä adheesiosta sekä sementin kivipartikkeleiden ja teräspinnan mikroskooppisen epätasaisuuden välisestä lukittumisesta. Adheesiosidoksen murtuminen tapahtuu erittäin pienillä suhteellisella siirtymällä, joten sen vaikutus käytännössä on pieni. Adheesiosidoksen murtumisen jälkeen voiman siirtyminen tapahtuu kitkan kautta. [2]

### *Kitka*

Kitka on kahden samansuuntaisen liukupinnan liukuman vastustamista, kun pinnat pysyvät kontaktissa kohtisuoran puristusjännityksen vaikutuksesta. Kitkaan liittyvä radiaalinen puristusjännitys aiheutuu sementin kutistumisesta, liukupinnan karheudesta sekä sementin kivipartikkeleiden kiilautumisesta. Liukupinnan sijainti riippuu teräspinnan karheudesta, kun tietty raja-arvo ylitetään, liukupinta siirtyy teräs-sementti rajapinnasta sementtikerrokseen langan ympärillä. Liukupinnan kulumisen seurauksena puristusjännitys ja kitka heikkenevät liukuman kasvaessa. [2]

Jännitetyn punoksen vapautuessa sen poikkipinta-ala kasvaa Poisson-efektin seurauksena. Laajeneminen on suoraan verrannollinen jännepunoksen pituussuuntaisen jännityksen muutoksen kanssa. Laajenemisesta aiheutuva radiaalinen puristusjännitys myötävaikuttaa voiman siirtymiseen kitkalla. Vastaavasti jos punoksen jännitys kasvaa, poikkipinta-ala pienenee. Yksittäisen suoran langan tapauksessa vaikutus kitkasidoksen heikkenemiseen on huomattavaa. Ilmiötä käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.3. [2]

Betonin ja teräksen välistä kitkaa on tutkittu ajoittain, mutta raportoiduissa kitkakertoimissa on suurta vaihtelua. Vaihtelua voidaan osaltaan selittää koejärjestelyjen eroilla, mutta kitkaan vaikuttavilla taustailmiöitä ei vielä täysin ymmärretä, joten tulokset ovat suuntaa-antavia. Yleisesti voidaan sanoa todellisen kontaktipinta-alan olevan nimellistä huomattavasti pienempi paikallisesti kohdistuneiden kontaktipisteiden vuoksi. Tästä seuraa kontaktipisteiden myötö puristuksessa, ja sen myötä kontaktipinta-alan kasvu normaalijännityksen kasvaessa. Liukupintojen välisen liukuman tapahtuessa kontaktipisteet leikkautuvat irti, tai kovat huippukohdat pakottavat uurteita pehmeämpään materiaaliin. [2]

Baltay & Gjelsvik saivat kitkakokeissa [4] tätä mallia tukevia tuloksia. Kokeissa testattiin sekä valssihilseisen että koneistetulla pinnalla olevan niukkahiilisen teräksen tartuntaa betonissa normaalijännityksen alla. Koneistetun teräspinnan kitkakerroin pysyi vakiona normaalijännityksen välillä 0...470 MPa, kun taas valssihilseisen teräksen kitkakerroin oli alkuun pienempi, mutta kasvoi normaalijännityksen kasvaessa. Koneistetusta pinnasta poiketen kova valssihilsekerros ei myötänyt kovien betonipartikkeleiden alla pienillä jännityksillä, mikä johti pienempään kontaktipinta-alaan ja kitkakertoimeen. Korkeammilla normaalijännityksillä (yli 70 MPa) betonin murskaantuessa kovat betonipartikkelit painuivat betonimassaan.

### *Mekaaninen lukittuminen*

Suoran langan ja teräspunoksen tartunta-liukumakäyttäytymisessä on havaittavissa selkeät erot. Yleisesti punoksen tartuntajännitys ei suorasta langasta poiketen putoa heti pienen liukuman tapahtuessa, vaan pysyy vakiona tai jopa kasvaa. Useimmiten ilmiötä selitetään epämääräisesti mekaanisella lukittumisella. [2]

Harjateräksen tapauksessa mekaaninen lukittuminen syntyy harjojen tukeutumisesta niiden väliseen betoniin. Jännepunoksen lankojen väliin muodostuu betonista vastaavia spiraalimaisia harjatukia. Harjateräksestä poiketen nämä betoniharjanteet eivät murroksessa leikkaudu irti vaan punos pääsee liukumaan betoniin muodostamassaan kanavassa. Punoksen liukuessa betonissa siihen aiheutuu kiertymisestä pakotettua muodonmuutosta, tai jännityksestä aiheutuneen muodonmuutoksen palautumisen estymistä. Tällöin punokseen kohdistuu vääntömomentti, joka on tasapainossa punoksen ja betonin välisten kosketusjännitysten kanssa. [2]

Kirjassa *Bond of reinforcement in concrete* [2, p. XX-XX kappale 6.2.2] on referoitu tutkimuksia aiheesta: Stocker & Sozen (1969) päättelivät mekaanisen lukittumisen aiheutuvan punoksen vääntömomentin sijasta sen poikkileikkauksen vaihteluista. Punoksen pienen vääntöjäykkyyden vuoksi vääntömomentin vaikutus on pieni. Heidän mukaansa toistensa kanssa epäsoivat poikkileikkaukset ovat suurin syy suoran langan ja punoksen erilaiseen tartuntakäyttäytymiseen. Kirjan mukaan Laldji & Young (1988) päätyivät vastaaviin päätelmiin. He kuitenkin huomauttavat poikkileikkausten epäsoivuuden syntyvän vasta riittävän suurella tartuntapituudella. Russel & Burns (1993) puolestaan esittävät estetyllä väännöllä olevan suuri merkitys mekaaniseen lukittumiseen, ja että vuoden 1969 tutkimuksessa päädyttiin päinvastaisiin tuloksiin koejärjestelyn vuoksi. Punoksen vääntö oli estetty suhteellisen kaukana betonipinnasta, verrattuna taivutushalkeamassa vallitsevaan puolikkaaseen halkeamaleveyteen. Tämän vuoksi ulosvetokokeissa punoksen kiertymä jakautui pidemmälle matkalle ja vääntömomentti jäi pieneksi.

### 3.3 Hoyer-efekti

Kun teräslankaa jännitetään vetämällä, sen halkaisija pienenee yleisen kimmoteorian mukaan Poisson-efektin seurauksena. Vetojännityksen poistuessa, esimerkiksi jänneteräksen katketessa, lanka pyrkii palautumaan alkuperäiseen halkaisijaansa. Jännepunoksen tapauksessa tämä aiheuttaa radiaalista puristusjännitystä ympäröivän sementtimassan vastustaessa laajenemista. Monilankaisten punosten tapauksessa radiaali-jännitystä aiheutuu lisäksi punoslankojen kiertymästä. Punosspiraali kiristyy jännityksessä, ja Poisson-efektin tavoin laajenee purkautuessaan jännityksen poistuessa. [3]

Normaali-jännitys kasvattaa punoksen kitkakerrointa [4] ja siten lisää tartunnan kykyä siirtää jännevoima ympäröivään rakenteeseen. Lisäksi jännevoiman siirtymiskyky paranee punosten laajenemisen aiheuttaessa kiilamaisen geometrian, sekä punosspiraalin mekaanisesta lukittumisesta. Näiden ilmiöiden jännevoiman ankkuroitumista parantavaa vaikutusta kutsutaan Hoyer-efektiksi. [3]

Injektointimassaan kohdistuva radiaali-jännitys aiheuttaa massassa jännepunoksen kehän suuntaista vetojännitystä, mikä saattaa johtaa massan halkeiluun. Punosten ollessa lähekkäin tämä saattaa aiheuttaa punosten välille vyöhykkeen jossa sementtimassa on halkeillut. [3]

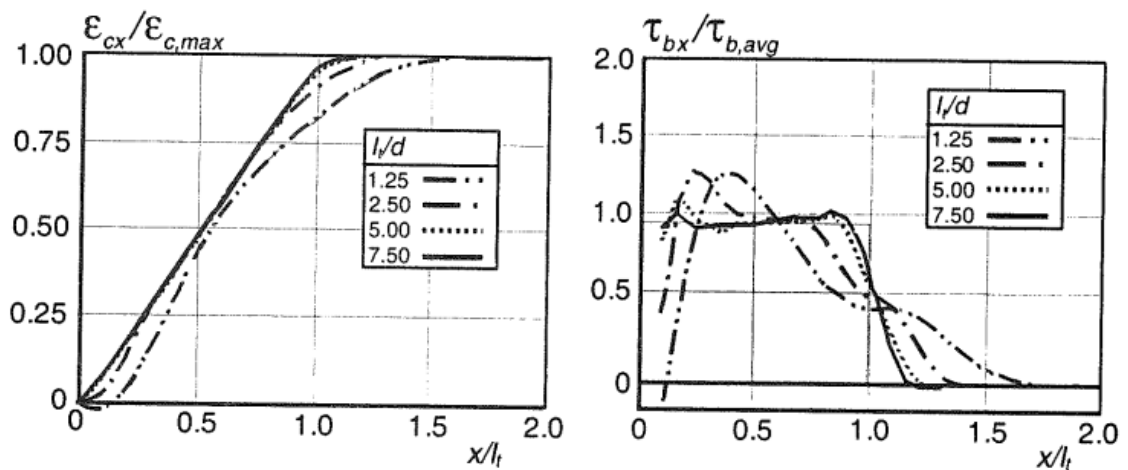
### 3.4 Tartuntalujuuden mallintaminen

Käytännön mitoittamisessa tartuntalujuuden kehitystä tartuntapituudella kuvataan yksinkertaistetulla mallilla. Tartunta- ja ankkuroitumisilmiöiden taustatekijöiden vaikutusten ymmärtäminen vaatii kuitenkin tartuntajännitys jakauman tarkempaa mallintamista. Kirjallisuudessa on esitetty erilaisia tartuntamalleja, joita käsitellään seuraavaksi (referoitu lähteestä [2], alkuperäislähteitä ei suurimmaksi osaksi saatavilla).

#### *Elastinen ja plastinen sidosvyöhyke*

Ankkuroitumiskapasiteettia voidaan kuvailla elastoplastisen tartuntajännitys jakauman avulla (Cousins et al. 1990). Elastisella alueella jakauma ajatellaan lineaariseksi ja plastisella alueella sen ajatellaan olevan vakio. Kun oletetaan jännitys jakauman betonin pinnalla vastaavan punoksen jännityskehitystä, voidaan johtaa elastisen tartuntajännityksen kulmakerroin, sekä plastinen tartuntajännitystaso. Jälkimmäisen tarkkuus on kuitenkin kyseenalainen. [2]

2D FEM-analyysin avulla voidaan tarkastella esijännitetyn särmiön jännitys jakaumaa, kun tartuntaa simuloidaan aksiaalisina puristusvoimina tartuntapituuden matkalla. Analyysistä huomataan betonipinnan puristumajakauman kaareutuvan tartuntapituuden lopussa myös tasaisella tartuntajännitys jakaumalla (Kuva 3.1, vasen). Tämän seurauksena puristumasta johdetussa tartuntajännityksen kuvaajassa on nähtävissä elastinen ja plastinen alue (Kuva 3.1, oikea). [2]



**Kuva 3.1** Esijännitetyn särmiön 2D FEM-analyysin tuloksia. Betonipinnan puristuma maksimipuristuman suhteen (vasen) ja tartuntajännitys keskimääräisen tartuntajännityksen suhteen tartuntapituuden matkalla (oikea). [2, alkuperäinen Den Uijl (1995)]



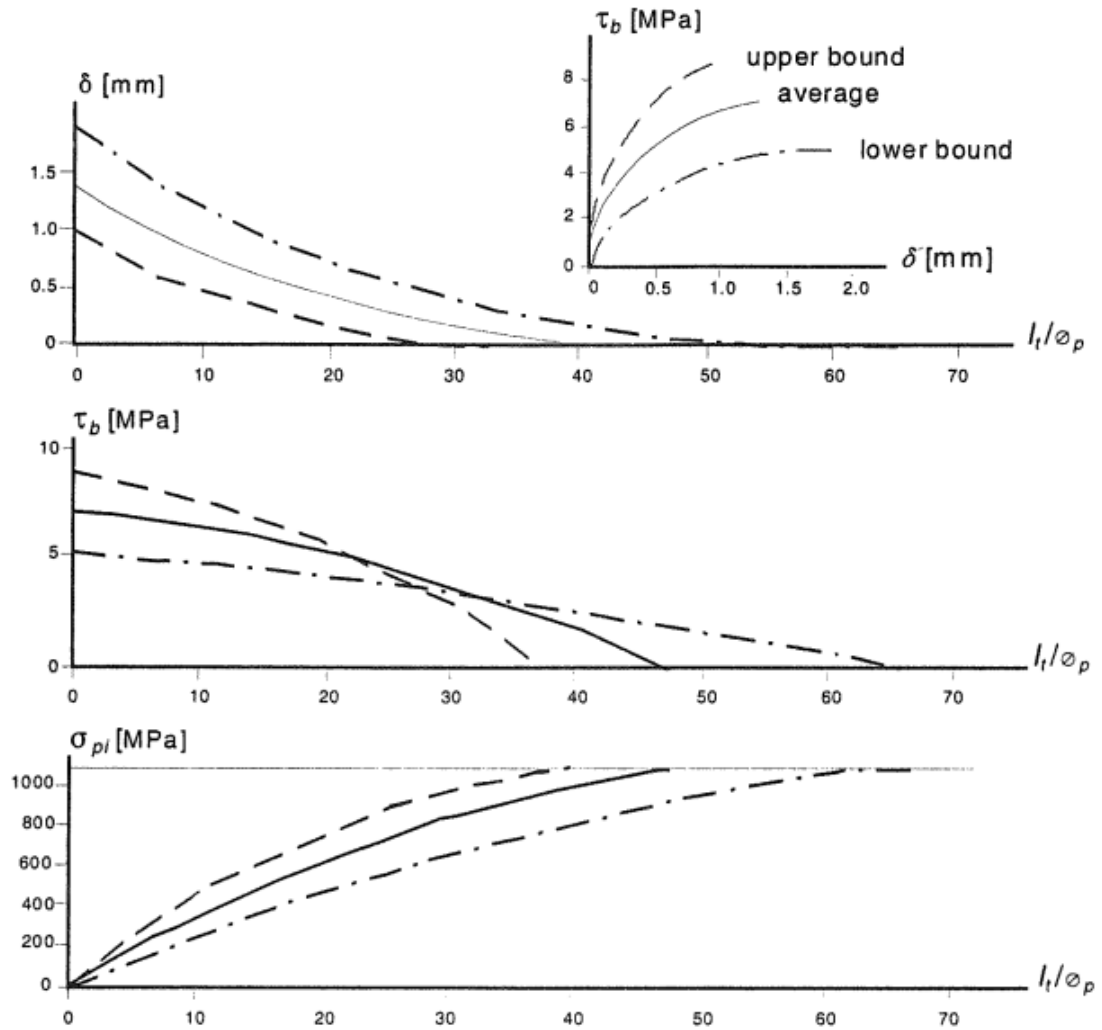
### *Tartuntajännitys liukuman suhteen*

Liukuman jakaumaa punoksen matkalla voidaan kuvailla toisen asteen differentiaaliyhtälöllä, kun otetaan huomioon tasapaino- ja yhteensopivuusehdot, sekä oletetaan lineaari- ja elastinen materiaalikäyttäytyminen ja että punosjännitys riippuu ainoastaan liukumasta. Yhtälöstä saadaan johdettua analyyttinen ratkaisu (Balázs 1992), kun oletetaan tartuntajännitys-liukumakäyrän noudattavan potenssiyhtälöä: [2]

$$\tau_b = \eta_1 \eta_2 f_{ci}^{0,5} \left( \frac{\delta}{\theta_p} \right)^{\eta_3} \quad (3.1)$$

, missä	$\tau_b$	on tartuntajännitys,
	$\delta$	on punosten liukuma,
	$\theta_p$	on punoksen nimellishalkaisija,
	$f_{ci}$	on betonin puristuslujuus,
	$\eta_1$	= 1,35; 1,0 ja 0,65 tartuntajännityksen ylärajalle, keskiarvolle ja alarajalle,
	$\eta_2$ ja $\eta_3$	ovat punoksen halkaisijasta riippuvia kokeellisia vakioita, $\eta_2 = 2,055$ ja $\eta_3 = 0,25$ , kun $\theta_p = 12,8$ mm.

Yhtälössä otaksutaan tartuntajännityksen olevan verrannollinen betonin puristuslujuuden neliöjuureen. Tällä tavoin saadaan esitettyä tartuntajännityksen, punosjännityksen ja liukuman jakaantuminen tartuntapituuden matkalla. Lisäksi saadaan muodostettua suhteet tartuntapituuden, punosten alkujännityksen, betonin lujuuden, punoshalkaisijan ja punoksen sisäänvedon välille. [2]



**Kuva 3.2** Liukuma, tartuntajännitys ja jännepunoksen jännitys tartuntapituuden matkalla, kun  $\theta_p = 12,8$  mm ja betonin lujuus  $f_{ci} = 40$  MPa. [2, alkuperäinen Balázs (1992)]

*Tartuntajännitys liukuman ja punosjännityksen suhteen*

Edellisen kohdan malli otaksuu tartunnan olevan riippuvainen ainoastaan liukumasta, eikä siten ota huomioon Poisson-efektin vaikutusta tartuntalujuuteen. Den Uijl (1992) johti punosten ulosveto- ja sisääntyöntökokeidensa tulosten pohjalta tartuntajännitykselle seuraavan empiirisen kaavan: [2]

$$\tau_b = 3 + 0,4\delta - 2,5 \cdot 10^{-3}\Delta\sigma_p + 1,5 \cdot 10^{-3}|\Delta\sigma_p| \quad (3.2)$$

, missä

$\tau_b$	on tartuntajännitys,
$\delta$	on punosten liukuma ja
$\Delta\sigma_p$	on punosjännityksen muutos.

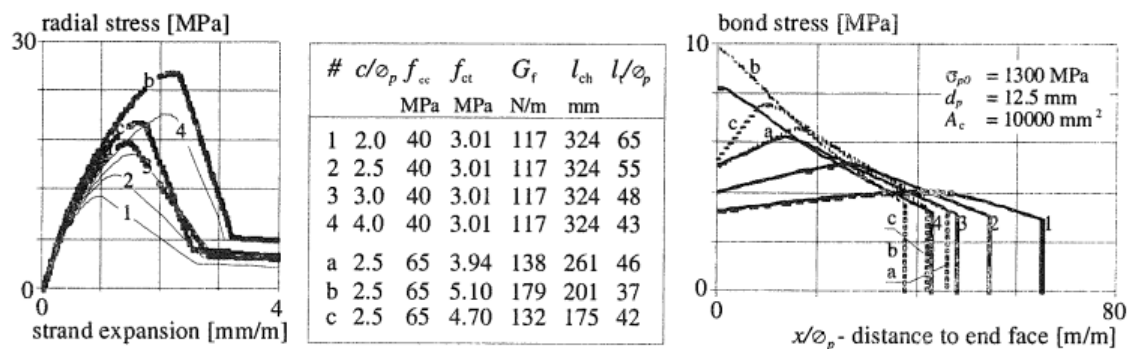
Yhtälön oikean puolen termit liittyvät järjestyksessä adheesioon, poikkileikkausten epä-sopivuuteen, Poisson-efektiin ja punoksen kiertymään. Huomattavaa on, että adheesioon

riippuvuus punoksen liukumasta on jätetty huomiotta ja oletetaan vakioksi. Kirjallisuudessa [2, alkuperäislähde Den Uijl (1994)] on esitetty kaava joka ottaa vaikutuksen huomioon. Kuitenkin, kaavan vakiot riippuvat muuttujista kuten betonin lujuus, jäykkyys ja kutistuma sekä teräspinnan karheus, joten niiden tarkka määrittäminen ilman tapauskohtaisia kokeita on erittäin epävarmaa.

### *Betonin muodonmuutoksia vastustava vaikutus*

Tartuntamekanismista riippumatta jännevoiman siirtymistä ympäröivään rakenteeseen yhdistävät jännepunoksen säteen suuntaiset puristusjännitykset. Puristusjännityksiä tasapainottavat jännepunosnippun kehän suuntaiset vetojännitykset, jotka saattavat aiheuttaa ympäröivän rakenteen säteittäistä halkeilua. Tämä asettaa ylärajan jännepunosten tartuntalujuudelle suurimman sallitun puristusjännityksen muodossa. Puristusjännitys voidaan yhdistää tartuntalujuuteen olettamalla kulma jännepunosten akselin ja säteittäisten jännitysten resultantin välille. Tarkempi tarkastelu, kuten Hoyer-efektin huomioon ottaminen, vaatii kuitenkin suhteen säteittäisten siirtymien ja jännityksen välille. [2]

Kuvitteellisten halkeamien mallia (fictitious crack model) voidaan käyttää kehän suuntaisten vetojännitysten määrittämiseen. Malli antaa vetojännityksen halkeamaleveyden suhteen, minkä seurauksena jännitys-venymä –suhde muuttuu tarkastelualueella. Tämän vuoksi jokaisella kehäsuuntaisella kuidulla vallitsee eri jännitys-venymä –suhde. Weerasekera & Loov (1990) ovat johtaneet jännitys-jakaumalle likimääräisen ratkaisun käyttämällä jokaiselle kehäsuuntaiselle kuidulle samaa jännitys-venymä –suhdetta. [2]



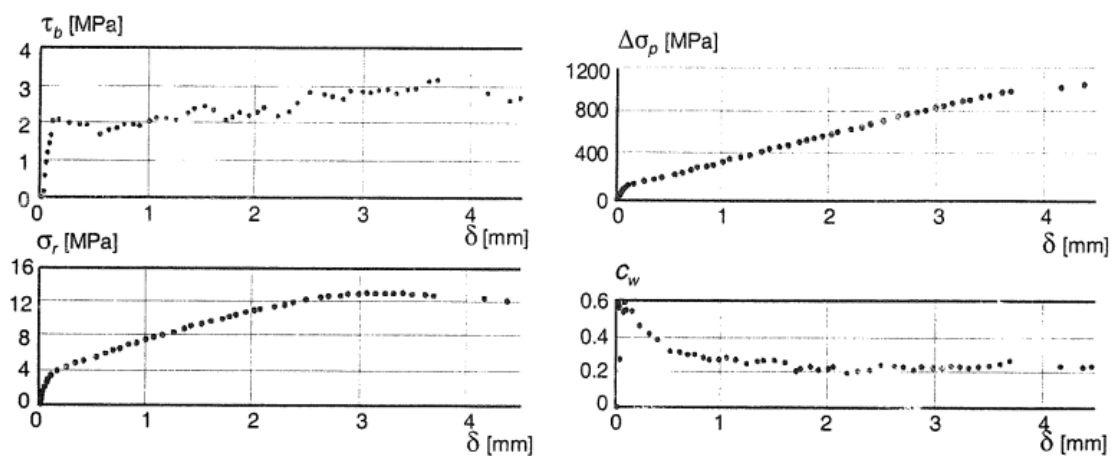
**Kuva 3.3** Betonin muodonmuutoksia rajoittava vaikutus (vasen) ja tartuntajännitys tartuntapituuden matkalla (oikea). [2, alkuperäinen Den Uijl (1998)]

### *Kitkakerroin liukuman suhteen*

Tartuntajännityksen kehittymistä tartuntapituudella voidaan kuvailla olettamalla suhde kitkakertoimen ja liukuman välille, joka ei ole riippuvainen poikkileikkauksen geometriasta vaan ainoastaan betonin ominaisuuksista. Se määritetään sisääntyöntökokeiden perusteella, joista saadaan tartuntajännitys liukuman ja punosjännityksen muutoksen funktiona. Näiden tietojen pohjalta saadaan määritettyä suhde liukuman ja punosrajapinnan

säteittäisen puristusjännityksen välille, kun puristusjännitys syntyy betonin ottaessa vastaan punosjännityksen aiheuttaman radiaalisen laajenemisen punosrajapinnassa. Lopulta kitkakerroin voidaan määrittää tartuntajännityksen suhteena säteittäiseen puristusjännitykseen. [2]

Van de Vondel & Kamoen (1992) oletivat betonin käyttäytymisen punosrajapinnan radiaalisesta siirtymästä aiheutuneeseen puristusjännitykseen ja sitä tasapainottavaan kehän suuntaiseen vetojännitykseen olevan elastoplastinen. Tämä oletus kuitenkin yliarvioi betonin muodonmuutoksia estävää vaikutusta. Myöhemmin Bogaerts & Brosens (1995) sovelsivat kuvitteellisten halkeamien mallia kuvailemaan betonin pehmenemiskäyttäytymistä. Kuvassa 3.4 on esitetty mallilla saavutettuja sisääntyöntökokeiden tuloksia. [2]



**Kuva 3.4** Kitkakerroin ( $c_w$ ) liukuman suhteen määritettynä 7-lankaisen jännepunoksen sisääntyöntökokeiden perusteella. [2, alkuperäinen Bogaerts & Brosens (1995)]

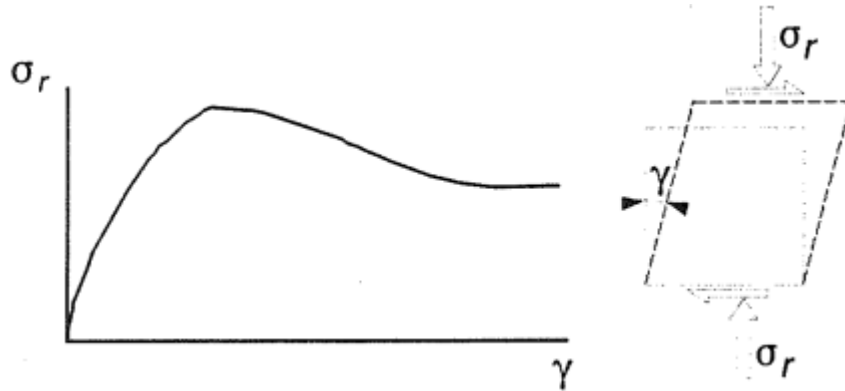
Huomattavaa on, että kuvan 3.4 mallissa punosrajapinnan radiaalinen siirtymä on yhtä suuri kuin punoksen laajeneminen, eikä betonin säteittäistä puristumaa oteta huomioon. Tästä aiheutuu betonin jäykkyyden yliarvioinnin kasvu säteittäisten halkeamien syventyessä. Lisäksi malli ei huomioi muita tartuntaan liittyviä ilmiöitä, kuten jänneterästen kiihtumista ja liukupinnan kulumista, mikä rajoittaa sen soveltamista. [2]

### Sidosrajapintamalli

Tartuntajännityksen mallintamiseksi on kehitetty sidosrajapintamalli (Åkesson (1993)), joka analysoi esijännitetyn rakenneosan ankkurointivyyhykettä. Tämä 3-ulotteinen rajapintamalli simuloi jännepunoksen rajapintakäyttäytymistä kitkan ja adheesion perusteella. Mallissa leikkausjännitys määritetään yhdensuuntaiseksi punoksen akselin kanssa ja normaalijännitys kohtisuoraksi punos-betoni –rajapinnan suhteen. Muut jännityskomponentit kiinnitetään nollaan. [2]

Mallissa oletetaan materiaalin elastoplastinen käyttäytyminen, jonka myötökriteeri noudattaa Coulomb-linjaa, että leikkausmuodonmuutos vaikuttaa ainoastaan leikkausjänni-

tykseen ja että materiaalin pehmeneminen on lineaarista. Adheesiolujuuden laskettua nollaan plastinen leikkausmuodonmuutos tulkitaan liukumana. Yksittäisen elementin tärkeä ominaisuus on niin sanottu laajenemiskäyrä (Kuva 3.5), joka kuvaa punoksen kiilautumista ja siitä aiheutuvaa liukupinnan kulumista. [2]



**Kuva 3.5** Säteittäinen puristusjännitys punosrajapinnassa liukupinnan leikkausmuodonmuutoksen funktiona. [2, alkuperäinen Åkesson (1993)]

*Tartuntapituuden suunnitteluvarvo Eurokoodin mukaan*

Julkaisussa Model Code 2010 [7, kappale 6.1.8.2-6.1.8.4] on esitetty kaavat tartuntapituuden laskemiseksi betonissa. Ensin määritetään betonin suunnittelulujuus ja jänneteräksen vetolujuuden suunnitteluvarvo:

$$f_{ptd} = f_{ptk} / \gamma_s \quad (3.3)$$

, missä  $f_{ptk}$  on jännepunoksen nimellislukuus ja  
 $\gamma_s = 1,15$  on teräksen materiaalin osavarmuuskerroin.

$$f_{ctd} = f_{ctk, \min}(t) / \gamma_c \quad (3.4)$$

, missä  $f_{ctk, \min}(t)$  on betonin vetolujuuden alempi ominaisarvo ja  
 $\gamma_c = 1,5$  on betonin materiaalin osavarmuuskerroin.

Betonin vetolujuuden suunnitteluvarvosta määritetään jännepunoksen tartuntalujuuden suunnitteluvarvo:

$$f_{bpd} = \eta_{p1} \eta_{p2} f_{ctd} \quad (3.5)$$

, missä  $\eta_{p1}$  on punostyyppin huomioonottava kerroin,  
 $\eta_{p1} = 1,2$  7-lankaisille punoksille,  
 $\eta_{p2}$  on punoksen sijainnin huomioonottava kerroin,  
 $\eta_{p2} = 1,0$  punoksille joiden kaltevuuskulma on  $45^\circ$ - $90^\circ$  betonin vaakatasoon nähden,

$$\eta_{p2} = 1,0 \quad \text{punoksille jotka ovat ainakin 250 mm päässä betonoinnin alapinnasta tai ainakin 300 mm päässä betonoinnin yläpinnasta,}$$

$$\eta_{p2} = 0,7 \quad \text{kaikille muille tapauksille,}$$

$$f_{ctd} \quad \text{on betonin vetolujuuden suunnitteluarvo.}$$

Nyt voidaan määrittää jännepunoksen tartuntapituuden perusarvo (tartuntapituus jolla vedetty jännepunos myötää ennen tartunnan pettämistä) kaavalla:

$$l_{bp} = \frac{A_{sp} f_{ptd}}{\phi \pi f_{bpd}} \quad (3.6)$$

, missä  $A_{sp}$  on jännepunoksen poikkipinta-ala,  
 $\phi$  on jännepunoksen nimellishalkaisija,  
 $f_{ptd}$  on jännepunoksen suunnittelulujuus ja  
 $f_{bpd}$  on jännepunoksen tartuntalujuuden suunnitteluarvo.

Näistä saadaan laskettua yksittäisen vapautetun jännepunoksen uudelleenankkuroitumis-pituus betonissa:

$$l_{bpt} = \alpha_{p1} \alpha_{p2} \alpha_{p3} \frac{\sigma_{pi}}{f_{bpd}} l_{bp} \quad (3.7)$$

, missä  $\alpha_{p1}$  on vapautuksen huomioonottava kerroin,  
 $\alpha_{p1} = 1,0$  hitaalle vapautukselle,  
 $\alpha_{p1} = 1,25$  äkilliselle vapautukselle,  
 $\alpha_{p2}$  on reaktiivoimien vaikutuksen huomioonottava kerroin,  
 $\alpha_{p2} = 1,0$  laskettaessa tartuntapituutta, kun taivutusmomentti- ja leikkauskapasiteetit otetaan huomioon,  
 $\alpha_{p2} = 0,5$  varmistettaessa jännevoiman kehittymisestä ja jakautumisesta aiheutuvia poikkisuuntaisia rasituksia,  
 $\alpha_{p3}$  on tartuntatilanteen huomioonottava kerroin,  
 $\alpha_{p3} = 0,5$  punoksille,  
 $\sigma_{pi}$  on punoksen jännitys ennen vapautusta, kun kaavaa sovelletaan jälkijännitettyyn tapaukseen ja  
 $l_{bp}$  on tartuntapituuden perusarvo.

## 4. KUORMITUSKOKEET

### 4.1 Kokeiden tavoite

Koejärjestelyllä mallinnettiin tilannetta, jossa jännepunokset katkeavat jossakin rakenteen poikkileikkauksessa ja uudelleenankkuroituvat koekappaleeseen. Tavoitteena oli selvittää jännepunosnippun uudelleenankkuroitumispituus 1000 MPa punosjännitykselle onnistuneella, täydellä injektoinnilla. Todellisen rakenteen kuormitusvaihtelua simuloitiin kohdistamalla punoksille lisäjännitystä lähellä uudelleenankkuroitumispuuden päätä. Tämän lisäksi oltiin kiinnostuneita injektoinnin epäonnistumisen vaikutuksesta uudelleenankkuroitumiseen. Osalla kokeista mallinnettiin tilannetta, jossa injektoinnin yläpintaan on jäänyt tyhjätila.

### 4.2 Koekappaleet ja tarvikkeet

Koekappaleina oli jälkijännitettyjä ja sementti-injektoituja teräsbetonipalkkeja. Palkkien päihin asetettiin teräksiset jännitysjakkarat, joiden avulla jännevoima jaettiin tasaisesti palkille. Palkin ja jännitysjakkaroiden lävitse jännitettiin jännepunosnippu, joka ankkuroitiin jännitysjakkaroiden päihin. Aktiivipään jännitysjakkara oli yhteensopiva jännitystunkin kanssa, jota käytettiin jännitystyössä sekä kuormituskokeissa lisävoiman kohdistamiseen jännepunoksiin. Tunkin ja jännitysjakkaran välissä oli ankkurointilevy, johon jännepunokset ankkuroituivat ankkurointikiiloilla. Tunkin työpuolella jännepunokset kiinnittyivät jännitysankkuriin. Passiivipään jännitysjakkara mahdollisti jännepunosten vapauttamisen. Jakkaran päähän teetettiin erillinen ankkurointilevy, jonka mekanismi mahdollisti ankkuroitujen jännepunosten vapauttamisen.



**Kuva 4.1** Yleiskuvaa koejärjestelystä.

### 4.2.1 Palkki

Ensimmäisessä vaiheessa koekappaleina oli 8 kappaletta  $400 \times 400 \text{ mm}^2$  palkkia, joiden pituus oli 3000 mm (koekappaleet 1-8). Toisessa vaiheessa koekappaleina oli 8 kappaletta vastaavia palkkeja, joiden pituus oli 1230 mm (4 kpl, koekappaleet 9-12) ja 1700 mm (4 kpl, koekappaleet 13-16). Palkkien päihin sijoitettiin  $400 \times 400 \text{ mm}^2 \times 8 \text{ mm}$  teräslevyt, joissa oli reikä jännepunosnippua varten. Levyjen tarkoituksena oli muodostaa tiivis liitos betonin ja teräksen rajapintaan paikallisten jännitysten minimoimiseksi.



**Kuva 4.2** Teräslevy ennen palkin valua.

Pituussuunnassa palkin lävitse oli asetettu hieman epäkeskeisesti ( $h = 214 \text{ mm}$ ) teräksinen poimutettu suojaputki jänneteräksiä varten. Putken sisähalkaisija oli 80 mm. Suojaputkien kylkiin oli tehty 3 kappaletta reikiä, joihin asetettiin muoviletkun pätkät injektointia varten.



**Kuva 4.3** Injektointiletkun liitos suojaputkeen.

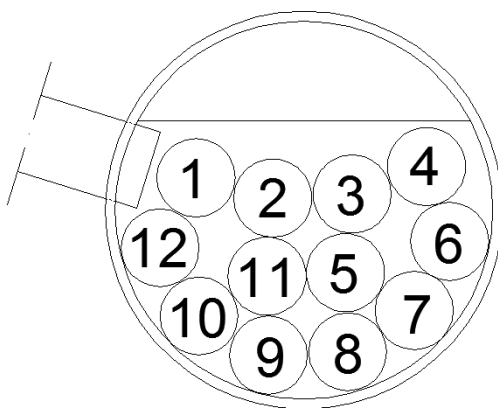
Koekappaleista puolet tehtiin vajaalla injektoinnilla. Tätä varten suojaputken yläpintaan asennettiin eristemuovista 20 mm korkea soiro, jolla estettiin putken täyttyminen kokonaan injektointimassalla.





**Kuva 4.4** *Eristemuovi suojaputken yläpinnassa vajaan injektoinnin aikaansaamiseksi.*

Koekappaleisiin suojaputken lävitse asetettiin 12 kappaletta jännepunoksia (Dywidag 0.62”, kokonaispoikkipinta-ala  $A_{sp,tot} = 12 \times 150 \text{ mm}^2 = 1800 \text{ mm}^2$ ). Jännepunokset asetettiin suojaputkeen kolmeen kerrokseen kuvan 4.5 mukaisesti. Suojaputken päät tulpatettiin polyuretaani-eristevaahdolla.



**Kuva 4.5** *Jännepunosten numerointi. Jännepunokset asetettiin suojaputkeen kolmeen kerrokseen. Oikealla jännepunosten asettuminen suojaputkeen valmiissa, koekappaleesta sahatussa poikkileikkauksessa.*

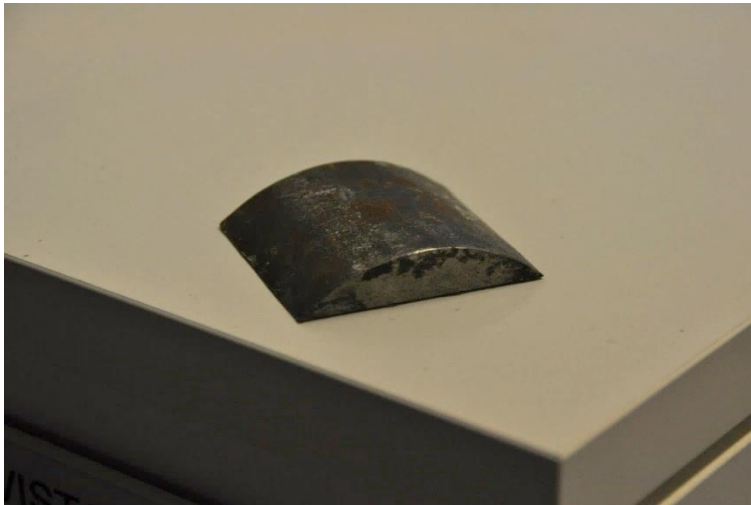
Koekappaleiden valussa käytettiin lujuusluokan C50/60 betonia, jonka maksimiraekoko oli 16 mm. Injektointisementtinä käytettiin CEM I 42,5 N portlandsementtiä vesi-sementtisuhteella 0,44. Sementtiin sekoitettiin 1 paino-% DaragROUT 181 (EH) –paisuttavaa lisäainetta, jolla on notkistava vaikutus.

#### 4.2.2 Jännitysjakkarat

Jännitysjakkarat valmistettiin kokeita varten konepajalla. Ne koostuivat kahdesta C-profiilista ja paksuista päätylevyistä. Niiden tarkoituksena oli toimia vastakappaleina ankkurointiosille, siirtää voima tasaisesti palkille ja koota jännepunokset nippuun palkin päähän. Jännitysjakkaran palkin puoleiseen reikään jänneterästen yläpuolelle kiilattiin lisäksi 12 mm korkea sirppimäinen teräskappale (myöh. sirppipala) pakottamaan jänneteräkset suojaputken alareunaan.



**Kuva 4.6** Aktiivipään (vas.) ja passiivipään (oik.) jännitysjakkarat.



**Kuva 4.7** Sirppipala jolla jänneteräkset pakotettiin suojaputken alareunaan.

Passiivipäässä jännepunokset levittäytyivät paljon leveämmälle vapautusmekanismin vuoksi. Jännitysjakkaran sisälle asetettiin erillinen kokoajalevy, jolla punokset koottiin yhteen jännitysjakkaraan kohdistuvien ohjausvoimien ja siitä aiheutuvan kitkan minimoimiseksi.



**Kuva 4.8** Passiivipään kokoajalevy.

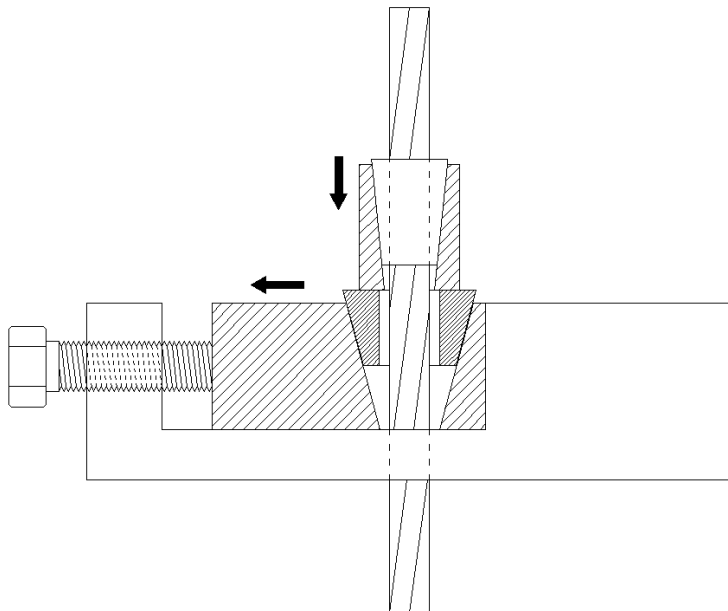
Molemmat jännitysjakkarat toimivat kokeen aikana voima-antureina. Jakkaroiden kylkiin oli asennettu neljä venymäliuskaa, jotka kalibroitiin voiman suhteen erillisillä jännitys-jakkaroille tehdyillä puristuskokeilla.

### 4.2.3 Ankkurointilevyt ja hydraulisylinteri

Passiivipään jännitysjakkaran päähän asetettiin ankkurointilevy, johon jännepunokset kiilattiin jännitystyön alussa. Passiivipään ankkurointilevy mahdollisti jänneterästen vapauttamisen. Levyssä oleviin syvennyksiin asetettiin kaksi kiilapalaa, joiden väliin kolmas kiilapala tukeutui. Tämän varassa oli ankkurikappale, johon jännepunos ankkuroitui. Kahta alimmaista kiilapalaa pystytettiin päästämään etäämmälle toisistaan pultteja avaamalla, jolloin kolmas kiilapala pääsi liukumaan niiden välissä, jänneteräksen jännitys poistui ja ankkurikappale voitiin poistaa.



**Kuva 4.9** Passiivipään ankkurointilevy, vapautettuja (yllä) ja vapauttamattomia (alla) jännepunoksia.

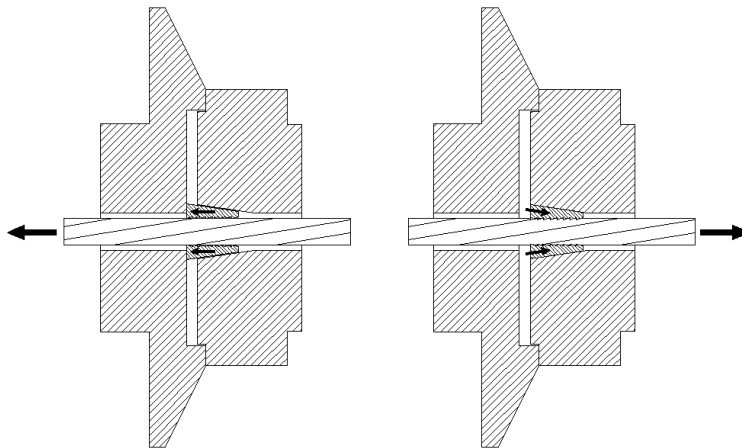


**Kuva 4.10** Vapautusmekanismin periaatepiirros.

Aktiivipään jännitysjakara oli yhteensopiva Dywidagin 6812 ankkurijärjestelmän kanssa. Aktiivipään jännitysjakaran ja hydraulisynterin väliin asetettiin ankkurilevy. Jännepunokset kulkivat ankkurilevyn kiilamaisten reikien (kiilapesien) lävitse ja kiilapesiin jännepunosten ympärille asetettiin kiilapalat, joihin punokset ankkuroituivat. Ankkurilevyn ja hydraulisynterin väliin asetettiin jännityspääkappale, joka jakoi voiman hydraulisynterille ja esti kiilapaloja liikkumasta jännepunosten mukana punoksia vedettäessä. Tämän vuoksi jännepunokset liukuivat vedettäessä kiilojen lävitse, mutta kun veto vapautettiin, kiilat tarttuivat punoksiin ja painautuivat ankkurilevyn reikiin ja jännepunokset ankkuroituivat jännevoimaan.



**Kuva 4.11** Vasemmalta oikealle: hydraulisynteri, jännityspääkappale, ankkurilevy ja jännitysjakara.

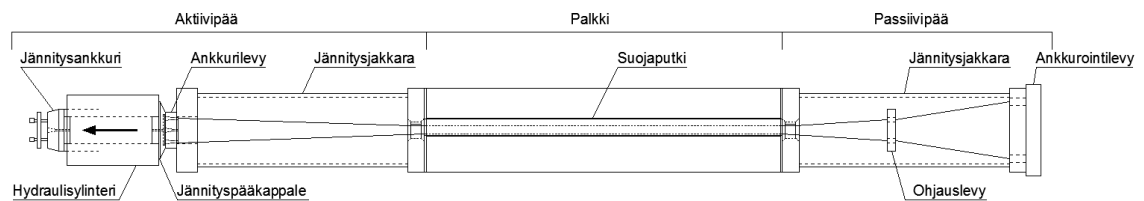


**Kuva 4.12** Ankkurilevyn ja ankkuroinnin toimintaperiaate. Jännittäminen jännepunoksia vetämällä (vas.) ja ankkuroituminen (oik.), kun jännitysvoima vapautetaan ja jännepunos pyrkii palaamaan alkupituuteensa ja vetää kiilapalat kiilapesään.

Jännitystyössä käytettiin komposiittirakenteista hydraulisylinteriä, jonka suurin käyttöpaine oli 700 bar, jolloin sylinterin tuottama voima oli 2700 kN. Hydraulisylinteri tukeutui vasten jännityspääkappaletta, joka jakaa voiman sylinterille. Hydraulisylinterin voima siirrettiin jännepunoksille jännitysankkurilla. Jännitysankkurin kiilat pystytettiin irrottamaan jännepunoksista ankkuroinnin jälkeen.

### 4.3 Koejärjestely

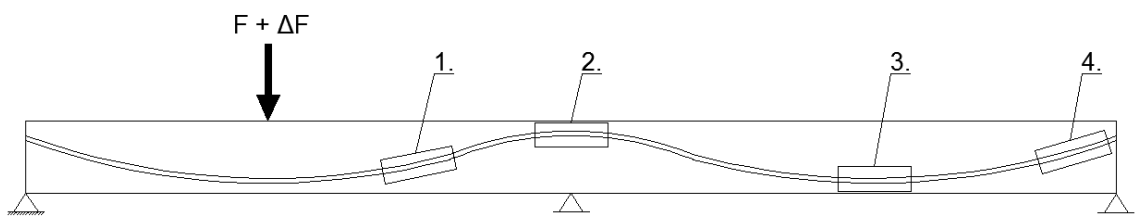
Kokeita varten koekappaleet ja tarvikkeet aseteltiin kuvan 4.13 osoittamalla tavalla.



**Kuva 4.13** Koekappale ja tarvikkeet koejärjestelyssä.

Koejärjestelyllä pyrittiin kuvaamaan todellista jännitettyä rakennetta tilanteessa, jossa jännepunokset ovat katkenneet taivutetun palkin jossakin poikkileikkauksessa. Jännepunoksiin kohdistuu esijännitys jälkijännityksestä ja lisäjännitys kuorman aiheuttamasta taivutusmomentista. Kun oletetaan tasojen pysyvän tasoina, kasvaa jännepunosten jännitys betoniin nähden kimmokerrointen suhteessa, eli noin 7 kertaisesti. Käyttörajan jännitysvaihtelu punoksille voisi tällöin olla luokkaa 100 MPa.

Kuvassa 4.14 on esitetty koepalkin sijainti eri puolilla todellista rakennetta. Kriittisiä pisteitä ovat suojaputken notkokohdat (2. ja 3.), sillä niihin muodostuu herkästi injektoinnin tyhjätiloja, ja taivutusmomentit ovat suuria. Jänneiden ankkurointialueet (4.) ovat puolestaan yleisiä siltojen kosteuden aiheuttamia jännepunosten vaurioalueita. Ankkurointialueilla betonin halkeilu on myös yleistä suurista paikallisista voimista johtuen. Yleisessä tilanteessa (1.) jännepunokset kulkevat vaihtelevissa paikoissa suojaputkessa ja injektointi on yleensä hyvä. Alueita 1. ja 4. kuvataan kuormituskokeissa täyden injektoinnin koekappaleilla. Aluetta 2. kuvataan vajaan injektoinnin koekappaleella, punokset kulkevat suojaputken alareunassa ja tyhjätila sijaitsee putken yläpinnassa.



**Kuva 4.14** Koejärjestelyn asema todellisessa rakenteessa.



Kuormituskokeet toteutettiin kahdessa vaiheessa, jännitysvaiheessa ja vapautuskokeessa. Jännitysvaiheessa jännepunokset jännitettiin ja ankkuroitiin, minkä jälkeen suojaputki injektointilaastilla. Injektointilaastin annettiin kovettua noin viikko, minkä jälkeen toteutettiin vapautuskoe. Vapautuskokeessa jännepunoksia vapautettiin passiivipäästä ja niihin vedettiin lisäjännitystä aktiivipäässä.

Palkin puristumia mitattiin venymäanturein betonin pinnasta ja jännevoimia palkin päissä jännitysjakkaroilla. Jännepunosten ulostuloa mitattiin palkin aktiivipäässä siirtymäanturilla, joka oli kiinnitetty yhteen päällimmäisistä jännepunoksista siten, että se mittasi ulostuloa jännitysjakkaran pään sisäpinnan suhteen.

Betonin puristuman mittaamiseen käytetyt venymä-anturit olivat Kyowa KC-70-120-A1-11L1M2R. Jännitysjakkaroiden voiman mittaamiseen käytetyt venymäanturit olivat Kyowa KFGS-5-120-C1-11L1M2R liimattavia venymäliuskoja. Jännepunosten ulostulon mittaamiseen käytetty siirtymäanturi oli malliltaan Novotechnik TS-100. Mittaussignaalia luettiin National Instruments NI cDAQ-9178 laitteella, jonka yhteydessä käytetyt moduulit olivat malliltaan NI 9235. Mittausdata tallennettiin tietokoneelle.

#### 4.3.1 Jännitysvaihe, ankkurointi ja injektointi

Palkin valmistelu koostui jännitys-, ankkurointi- ja injektointivaiheista. Tavoitteena oli ankkuroida jännepunoksiin noin 1000 MPa jännitys, mikä vastasi 1800 kN jännevoimaa. Ankkuroinnissa jouduttiin ottamaan huomioon ankkurointiliukuma, joka aiheuttaa jännityshäviötä. Ankkurointiliukumaksi mitattiin erillisellä kokeella noin 4,3 mm, mutta ensimmäisten kokeiden perusteella se oli noin 4,6 mm. 3000 mm koepalkeilla tämä tarkoitti noin 300 kN jännityshäviötä, 1700 mm koepalkeilla noin 400 kN jännityshäviötä ja 1230 mm koepalkeilla noin 450 kN jännityshäviötä. Betonin virumasta aiheutuvat häviöt jätettiin ankkuroinnissa huomiotta.

Jännitysvaiheessa jännepunoksiin vedettiin tavoitevoiman  $P_0 = 1800$  kN lisäksi ankkurointiliukumasta aiheutuvan häviön suuruinen lisävoima  $\Delta P$  voimahäviön kompensoimiseksi. Jännittämisen aikana voimassa pidettiin 3 minuutin pituisia kuormitusportaita 250 kN välein.

Ankkurointivaiheessa hydraulisylinterin voima poistettiin ja jännepunosten annettiin ankkuroitua. Jännitysankkuri irrotettiin, hydraulisylinteri siirrettiin seuraavalle koepalkille, jolle jännitys- ja ankkurointivaiheet toistettiin.

Ankkuroinnin lopuksi suoritettiin injektointivaihe. Injektointilaastin sekoittaminen suoritettiin käsin vesisementtisuhteella 0,44. Lisäksi laastiin sekoitettiin 1 paino-% todellisissa injektointikohteissa käytettyä daragrout 181 (EH) -lisäainetta (paisuttava lisäaine, jolla on notkistava vaikutus). Laastia injektointiin suojaputkeen keskimmaisesta injektointilet-kusta laastipumppua käyttäen, kunnes laastia tuli ulos 2 muusta injektointiletkuista, tai

injektointi tukkeutui toisesta tai molemmista päistä (injektointipaine nousi pumpun maksimiin), jolloin injektointia jatkettiin muista injektointiletkuista.

Ankkuroinnin jälkeen koepalkki oli jännitettynä ja injektoituna. Injektoinnin annettiin kovettua noin viikon ajan. Tänä aikana toisesta koepalkista mitattiin betonin puristumia ja jännevoimaa viruman seuraamiseksi.

### 4.3.2 Vapautuskoe

Vapautuskoe koostui useasta vaiheesta:

- 1. vapautus
  - Vapautetaan jännepunokset 1-4
  - Kaikkia jännepunoksia kuormitetaan lisäjännityksellä
- 2. vapautus
  - Vapautetaan jännepunokset 5-6 sekä 11-12
  - Kaikkia jännepunoksia kuormitetaan lisäjännityksellä
- 3. vapautus
  - Vapautetaan jännepunokset 7-10
  - Kaikkia jännepunoksia kuormitetaan lisäjännityksellä
- Lisäjännitys maksimivoimaan
- Aktiivipään jännepunosten vapautus katkaisemalla

Jokaisessa vapautusvaiheessa vapautettiin passiivipäästä 4 punosta. Jokaisessa lisäjännitysvaiheessa punoksia vedettiin 3 minuutin ajan 100 MPa lisäjännityksellä (180 kN) laskeutena voiman arvosta kokeen alussa. Lisäjännitys maksimivoimaan tarkoitti hydraulisylinterin tuottamaa maksimivoimaa, joka oli noin 2700 kN. Maksimivoimaan jännittäessä voimassa pidettiin 3 minuutin kuormitusportaita 250 kN välein.

Jännevoimaa palkin molemmissa päissä mitattiin jännitysjakkaroiden venymäantureilla. Palkin puristumia mitattiin palkin kylkeen asennetuilla venymäliuskoilla. Punosten ulostuloa mitattiin aktiivipäästä, yhdestä punoksesta jännitysjakkararan sisäpinnan suhteen. Arvot tallennettiin 10 Hz taajuudella.

## 4.4 Kokeiden tulokset

Seuraavissa kappaleissa käsitellään kokeiden tuloksia, miten raakadataa jouduttiin käsittelemään tulosten määrittämiseksi, miten eri kuormitusvaiheet näkyvät tuloksissa, sekä mitä tuloksia kokeista saatiin. Tulokset on esitelty koeryhmittäin. Kaikki suoritettut kokeet on esitetty, vaikka joidenkin tulokset eivät olleetkaan käyttökelpoisia.



#### 4.4.1 Datan käsittely

Vapautuskokeista saatiin mittaustuloksina:

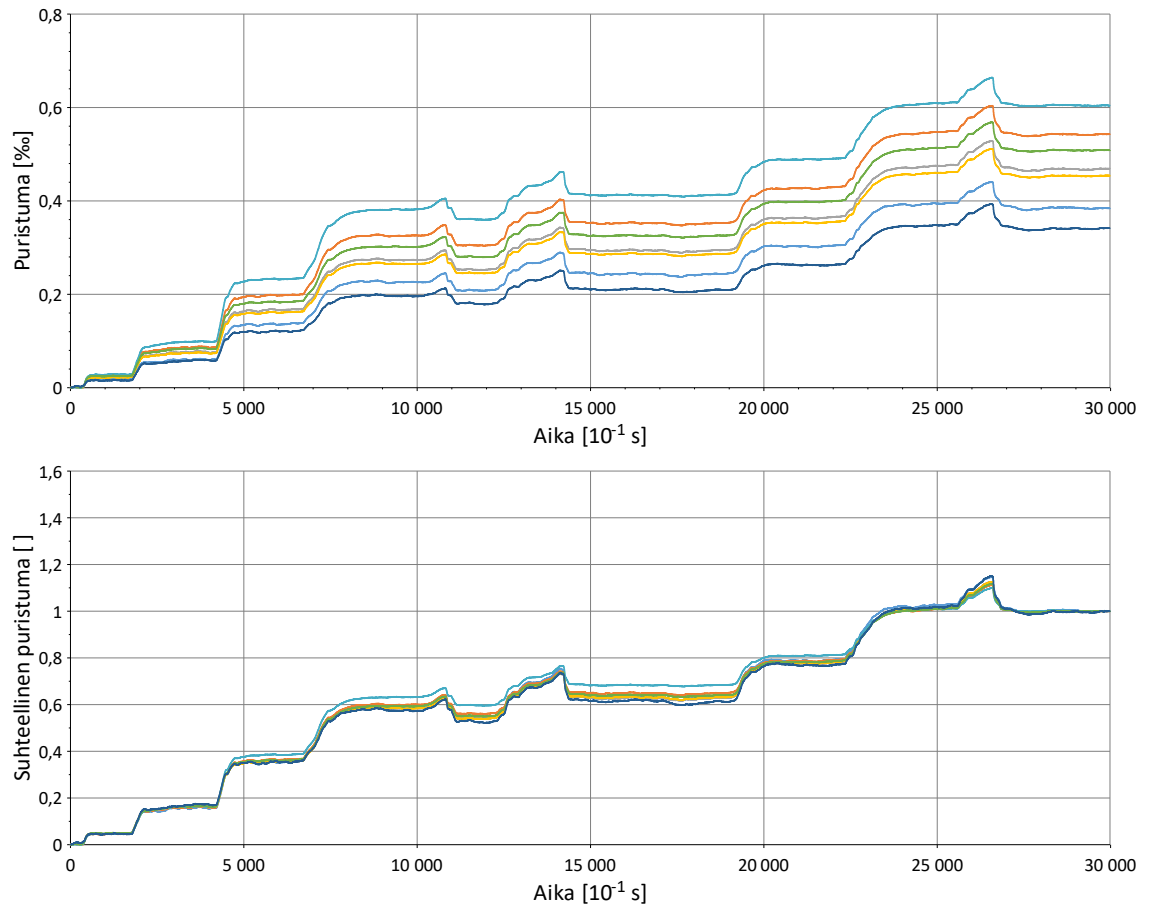
- Voiman arvot aktiivi ja passiivipäissä
- Puristuma venymäantureista palkin matkalla
- Jännepunosten ulostulo aktiivipäässä lisäjännityksellä (yhdestä punoksesta)

Voiman arvo saatiin neljästä venymäliuskasta jännitysjakkarasta. Niiden tuloksista otettiin keskiarvo, joka kerrottiin jännitysjakkaralle määritetyllä kertoimella, jolloin tulokseksi saatiin jännitysjakkarassa vaikuttava puristusvoima.

$$F_x = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4)}{4} * k_{voima} \quad (4.1)$$

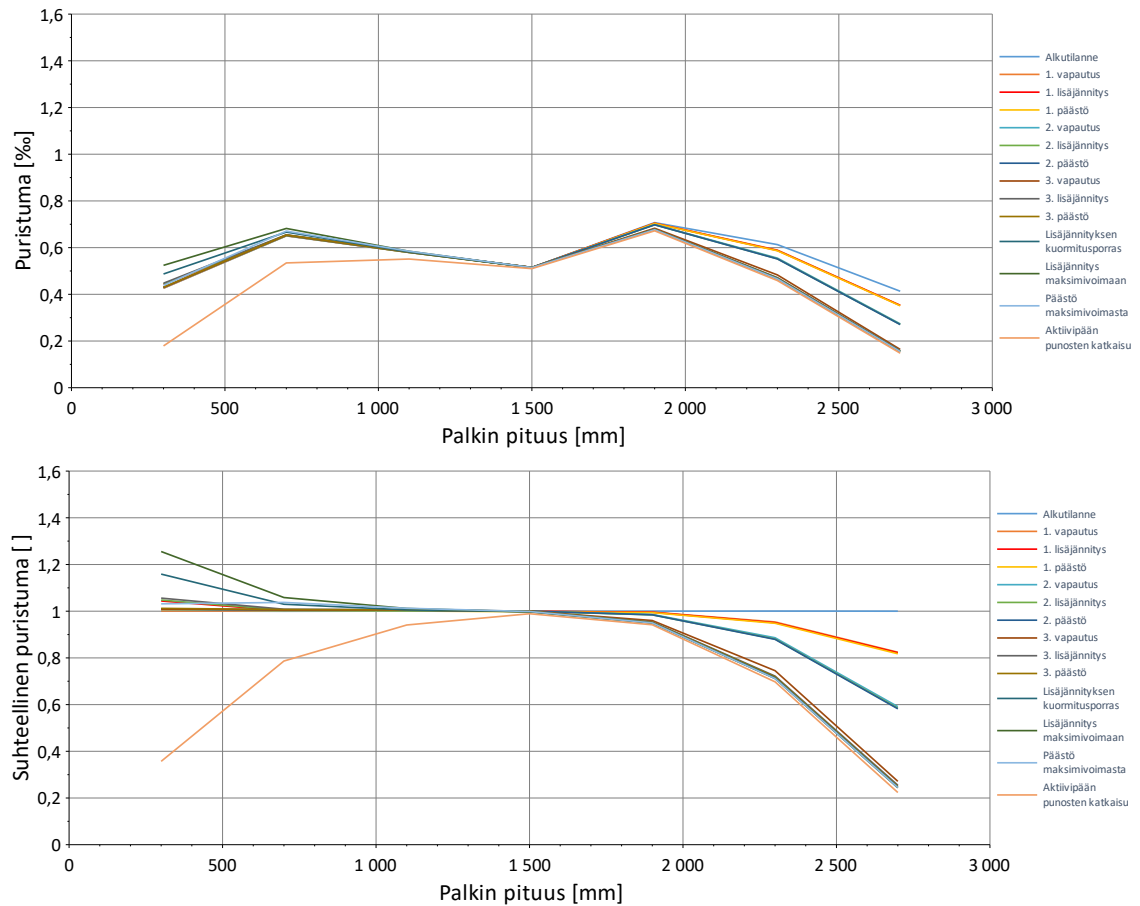
, missä  $F_x$  on puristusvoima jännitysjakkarassa ( $x = \text{aktiivi tai passiivi}$ ),  
 $\varepsilon_{F.1...4}$  on puristuma venymäliuskoissa 1...4 ja  
 $k_{voima}$  on jännitysjakkaralle ominainen voimakerroin.

Betonin puristumasta saatiin palkin matkalta koekappaleesta riippuen 7 tai 9 arvoa. Näiden puristumakuvaajien kulmakertoimet erosivat toisistaan tilanteessa, jossa puristuman palkin matkalla ajateltiin olevan vakio, kuten jännittäminen. Tämä saattaa johtua liuska-kohtaisista eroista, tai materiaalin epähomogeenisyydestä. Puristuman palkin matkalla oletettiin olevan ankkuroinnin lopussa vakio. Liuskojen tulokset suhteutettiin päättymään samaan pisteeseen, puristuman suhteelliseen arvoon 1 jakamalla mittaustulokset kyseisen liuskan viimeisellä mittaustuloksella.



**Kuva 4.15** Puristuman arvot ankkurointikokeessa ennen (yllä) ja jälkeen (alla) tulosten suhteuttamista.

Injektointimassan kovettumisen aikana puristuman arvot muuttuivat jonkin verran muun muassa viruman vaikutuksesta. Vapautuskokeen tulokset siirrettiin alkamaan arvosta 1, jotta puristuman muutokset tulisivat selkeämmin esille. Tämä aiheutti vääristymää puristumakäyrän muotoon sitä enemmän, mitä suurempi betonin viruma oli injektoinnin kovettumisen aikana. Vääristymä ei kuitenkaan vaikuttanut uudelleenankkuroitumispitouden määrittämiseen.



**Kuva 4.16** Vapautuskokeen puristumakäyrät ennen (yllä) ja jälkeen (alla) suhteuttamista ja siirtämistä.

Liuskujen suhteuttaminen toteutettiin laskennallisesti seuraavasti:

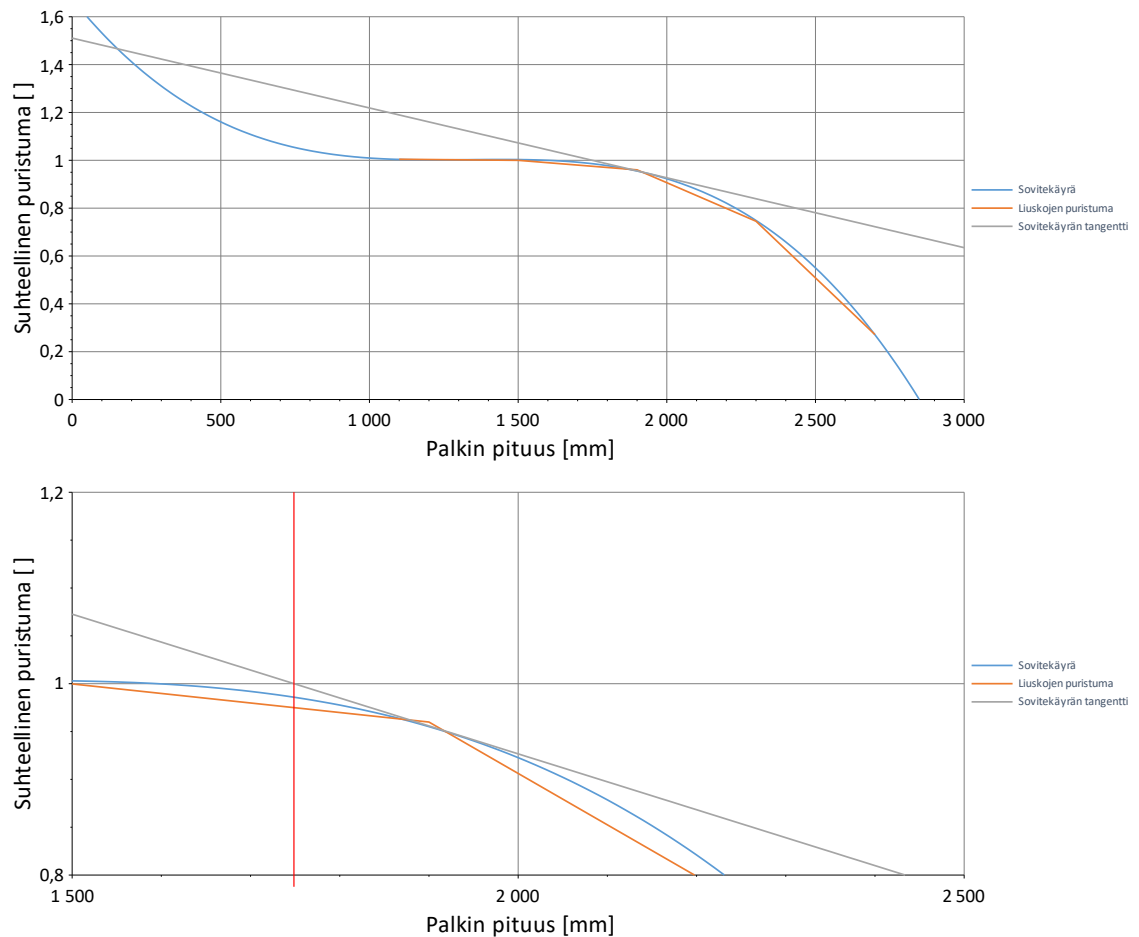
$$\varepsilon_{n,s}(t) = \frac{\varepsilon_n(t) - \varepsilon_0}{\varepsilon_f} + 1 \quad (4.2)$$

missä  $\varepsilon_{n,s}$  on liuskan puristuman suhteutettu ja siirretty arvo,  
 $\varepsilon_n$  on liuskan puristuman arvo,  
 $\varepsilon_0$  on liuskan puristuman alkuarvo ja  
 $\varepsilon_f$  on liuskan ankkurointivaiheen puristuman loppuarvo.

Jännepunosten ulostulon arvo nollattiin vapautuskokeen alussa.

Uudelleenankkuroitumispituuden määrittämisessä haluttiin päästä eroon silmämääräisen tarkastelun aiheuttamasta inhimillisestä vaikutuksesta ja suuren datamäärän aiheuttamasta tarkastelun työläydestä. Tämän vuoksi kuvan 4.16 suhteutetuista käyristä muodostettiin 3. asteen yhtälön muodon sovitteet. Sovitteet vastasivat puristumakäyriä useimmissa kokeissa hyvin. Pienet muutokset puristumassa aiheuttivat kuitenkin suuria muutoksia pisteessä jossa käyrä leikkaa suhteellisen puristuman arvon 1 (alkutilanteen arvo). Tämän vuoksi etsittiin piste jossa käyrä leikkaa arvon 0,95. Tällä pisteellä oli paljon pie-

nempi vaihtelu suuremmasta kulmakertoimesta johtuen, mutta piste ei vastannut silmä-  
määräisesti arvioitua uudelleenankkuroitumispituutta. Uudelleenankkuroitumispituus ha-  
ettiin muodostamalla käyrän tangentti tässä pisteessä. Uudelleenankkuroitumispiste mää-  
ritettiin pisteeksi, jossa tangentti leikkaa suhteellisen puristuman arvon 1. Uudel-  
leenankkuroitumispituus saatiin, kun palkin pituudesta vähennettiin tämän pisteen sijainti  
(vaaka-akseli määritetty alkamaan aktiivipäästä). Tulosten arvioitiin olevan koejärjeste-  
lyn ja mittaustarkkuuden puitteissa riittävän tarkkoja.



**Kuva 4.17** Jännepunosten uudelleenankkuroitumispisteen määrittäminen puristuma-  
kuvaajan sovitteesta. Uudelleenankkuroitumispiste merkitty kuvaan punaisella.

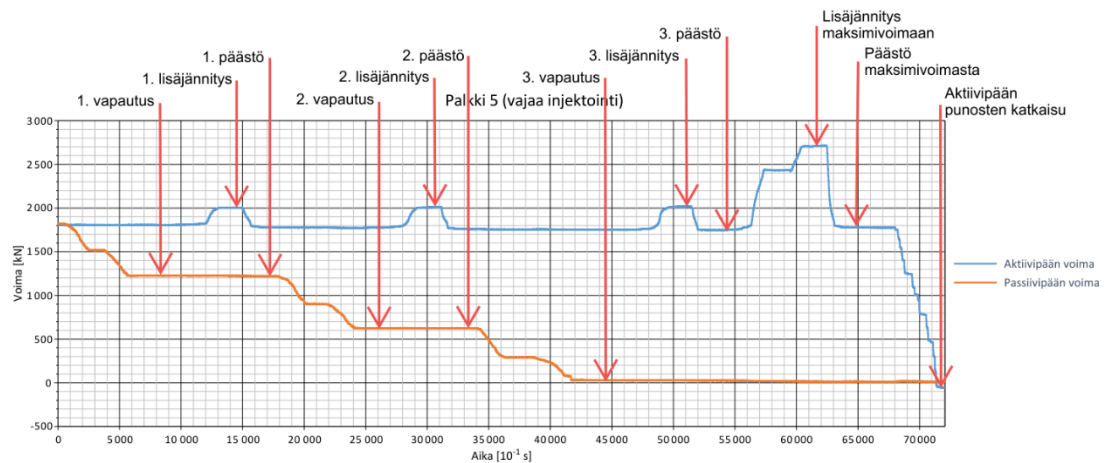
#### 4.4.2 Kokeiden suoritus

Aktiivi- ja passiivipään voimista, sekä jännepunosten ulostulon arvoista muodostettiin kuvan 4.18 mukaiset kuormituskäyrät.

Betonin puristuman mittaustuloksista muodostettiin kuvan 4.16 mukaisia puristuma-käyriä. Niissä näkyi betonin puristuma palkin matkalla tietyssä kuormituksen vaiheessa. Kiinnostavia kuormituksen vaihteita olivat:

- 1. vapautus
- 1. lisäjännitys
- 1. päästö
- 2. vapautus
- 2. lisäjännitys
- 2. päästö
- 3. vapautus
- 3. lisäjännitys
- 3. päästö
- Lisäkuormitus maksimivoimaan
- Päästö maksimivoimasta
- Aktiivipään punosten katkaisu

Kuvassa 4.18 nämä vaiheet on esitetty vapautuskokeen voimakuvajassa.



**Kuva 4.18** Vapautuskokeen vaiheet.

### 4.4.3 Palkit 1-8

Palkeilla 1-8 pyrittiin saamaan kokemusta koe- ja mittausjärjestelyistä, sekä kokeiden suorittamisesta. Näiden perusteella koejärjestelyä kehitettiin tarvittavilta osin. Koetulosten perusteella oli tarkoitus määrittää ankkurointi- ja tartuntapituus ainakin alustavasti. Näiden perusteella määritettäisiin seuraavien koepalkkien pituus, jotta uudelleenankkuroitumis- ja tartuntapituus saataisiin kohtaamaan.

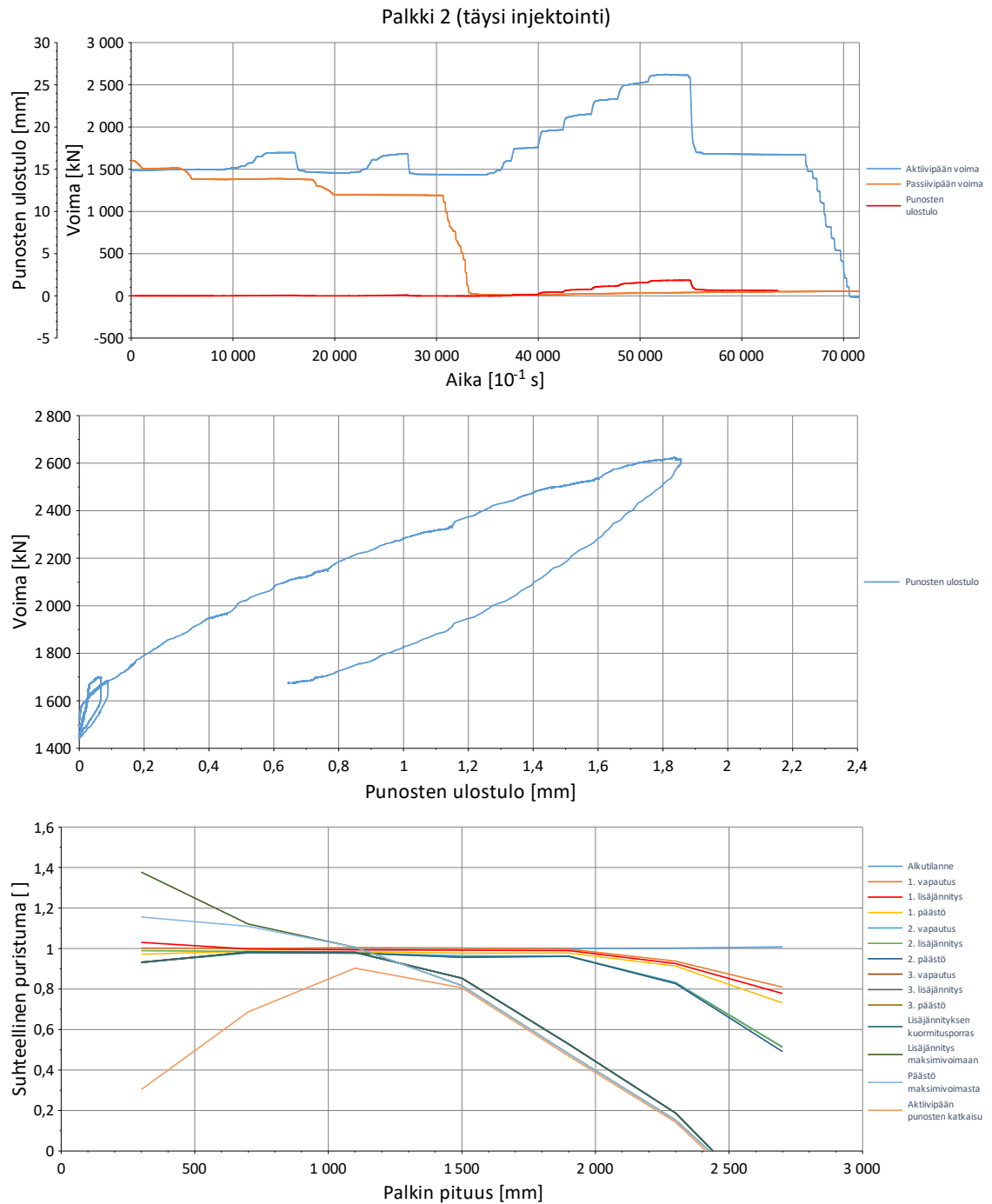
#### Palkit 2 ja 3, täysi injektointi

Ensimmäisenä suoritettiin ankkurointikokeet palkeille 2 ja 3. Palkin kestämisestä ei ollut laskennallisesti varmuutta, joten näissä kaikki punokset ankkuroitiin ensin kokonaisvoimaan 1000 kN, minkä jälkeen 8 päällimmäiseen punokseen ankkuroitiin lisäkokonaisvoima 500 kN. Näin päällimmäisiin jännepunoksiin saatiin tavoiteltu 1000 MPa jännitys pienemmällä kokonaisvoimalla. Tämän jälkeen palkit injektointiin injektointimassalla.

Ankkuroinnin aikana huomattiin, että mittausjärjestelyn johtojen tai liittimien heiluttaminen aiheutti signaaliin suuria heilahteluja. Lisäksi johdotukset olivat alttiita vaurioitumiselle esimerkiksi päälle astuttaessa. Mittausjärjestelmän liittimet vaihdettiin tukevampiin ja kaikki johtoliitokset juotettiin kiinni, jolloin ongelma poistui.

Vapautuskokeessa vapautusjärjestelmä ei toiminut, vaan vapautusankkurin kiilapalat pureutuivat toisiinsa eivätkä vapauttaneet punosta kokonaan. Tämä huomataan vapautuskokeen voiman käyrässä, passiivipään voiman arvo ei pudonnut vapautuksissa odotettua määrää. Lisäjännitykset toteutettiin tästä huolimatta vapautusten välissä. Aktiivipään voima sekä punosten ulostulo käyttäytyivät normaalisti, arvot kasvoivat lisäjännittäessä ja palautuivat päästettäessä entiselle tasolle. Ennen maksimivoimaan lisäjännittämistä passiivipään jännepunokset katkaistiin polttoleikkaamalla.

Lisäjännityksen maksimivoimasta päästettäessä voiman arvo jäi odotetusti korkeammaksi, kun jänneteräket ankkuroituvat kiilapaloihin uudelle voimatasolle. Palkin todettiin kestävän maksimivoimaa hyvin. Puristuman arvo putosi passiivipäästä merkittävästi kolmannella vapautuksella (tässä tapauksessa punosten katkaisu polttoleikkaamalla). Viimeisen liuskan tulos oli tällöin negatiivinen, mikä tarkoittaisi betonin venyneen.

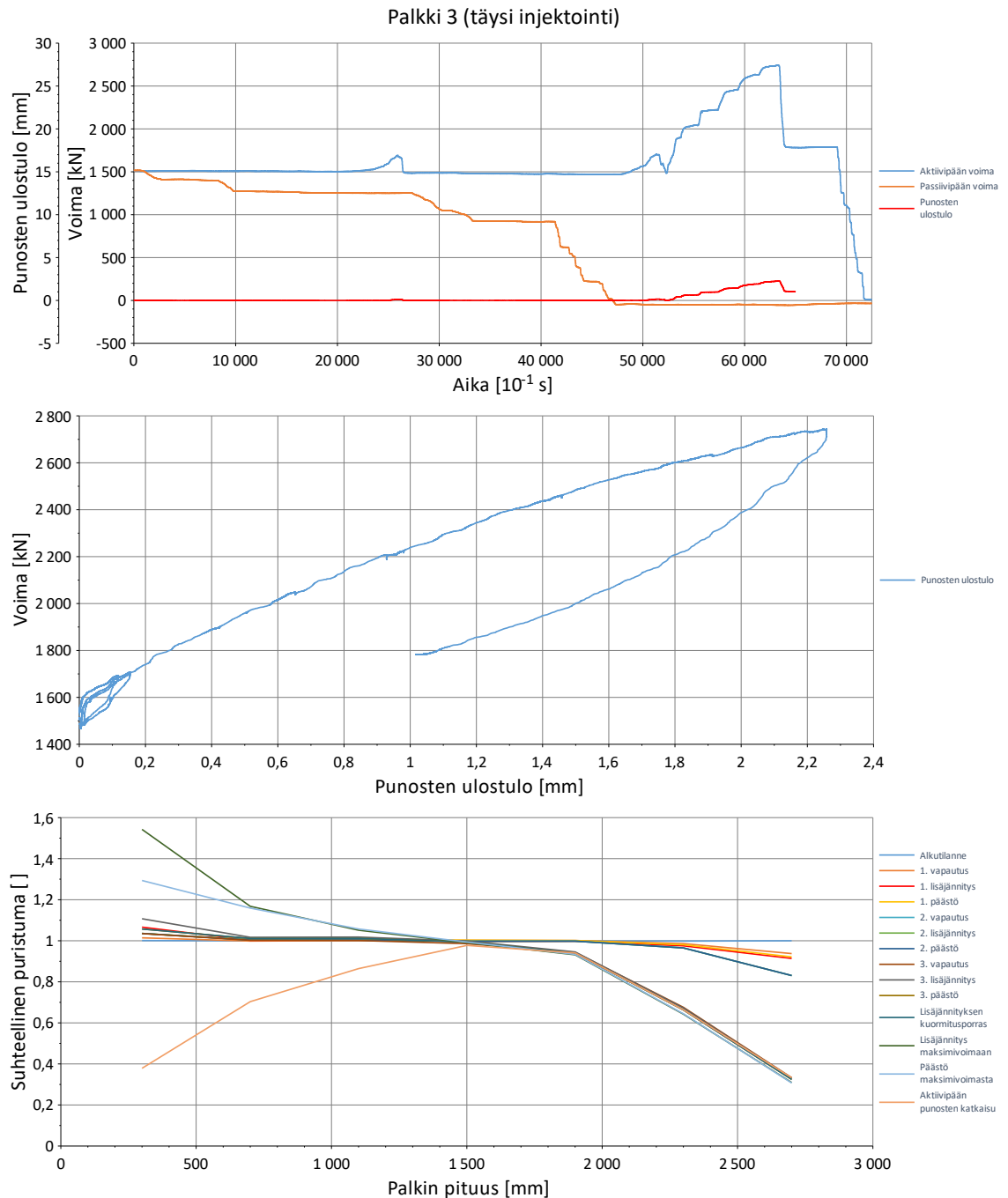


**Kuvaaja 4.1** Palkin 2 vapautuskokeen tulokset. Vapautuskokeen voimakäyrät, sekä punoksen aktiivipään ulostulo (yllä). Jännepunosten ulostulo aktiivipäässä voiman suhteen vapautuskokeen aikana (keskellä). Vapautuskokeen puristuman suhteelliset arvot palkin matkalla kokeen eri vaiheissa (alla), aktiivipää vasen, passiivipää oikea.

Palkin 3 vapautuskokeen voimakuvaajasta huomataan samat asiat kuin palkilla 2. Vapautusjärjestelmä ei toiminut kunnolla ja jännevoima ei vapautunut odotettua määrää. Kolmannella vapautuksella jännepunokset katkaistiin polttoleikkaamalla, jolloin voiman arvo putosi nolleen. Aktiivipään voima kasvoi lisäjännittäessä ja palautui päästettäessä entiselle tasolle, mutta toista lisäjännitystä tai voimatason pitoja ei pidetty. Voiman arvo asetettiin alkamaan ankkurointikokeen loppuarvosta. Jännepunosten ulostulo aktiivipäässä oli pientä ja se palautui lisäjännityksen päästössä.

Puristumakuvaajasta huomataan pieni puristuman muutos passiivipäässä 1. ja 2. vapautuksella ja suurempi kun passiivipään jännepunokset katkaistiin. Aktiivipäässä nähdään jännityslisäyksistä aiheutuvat puristuman kasvut ja jännepunosten katkaisusta aiheutuva puristuman pieneneminen.



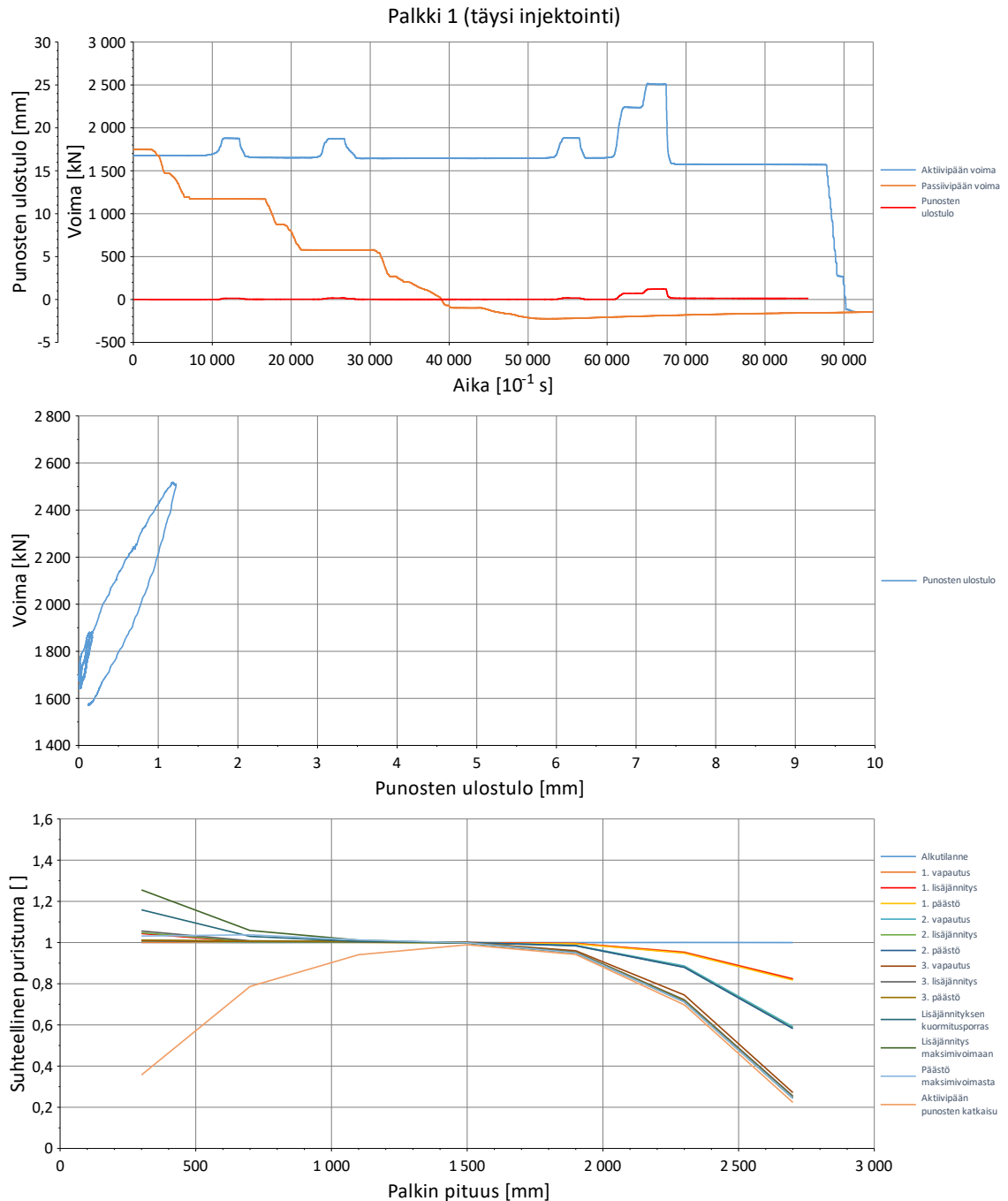


**Kuvaaja 4.2** Palkin 3 vapautuskokeen tulokset. Vapautuskokeen voimakäyrät, sekä punoksen aktiivipään ulostulo (yllä). Jännepunosten ulostulo aktiivipäässä voiman suhteen vapautuskokeen aikana (keskellä). Vapautuskokeen puristuman suhteelliset arvot palkin matkalla kokeen eri vaiheissa (alla), aktiivipää vasen, passiivipää oikea.

Vapautuskokeiden perusteella koejärjestelyä muutettiin siten, että kaikki jännepunokset jännitettiin samaan voimaan. Lisäksi vapautusankkurin kiilapallojen kulmia pyöristettiin reilusti hiomalla pureutumisen välttämiseksi. Kohtien 4.3.1 ja 4.3.2 mukaiset kuormitus-suunnitelmat sisältävät nämä muutokset.

## Palkki 1, täysi injektointi

Palkin 1 ankkurointikokeessa jännepunoksiin ankkuroitiin aktiivipäästä mitattuna 1794 kN jännevoima. Injektointi onnistui hyvin.



**Kuvaaja 4.3** Palkin 1 vapautuskokeen tulokset. Vapautuskokeen voimakäyrät, sekä punoksen aktiivipään ulostulo (yllä). Jännepunosten ulostulo aktiivipäessä voiman suhteen vapautuskokeen aikana (keskellä). Vapautuskokeen puristuman suhteelliset arvot palkin matkalla kokeen eri vaiheissa (alla), aktiivipää vasen, passiivipää oikea.

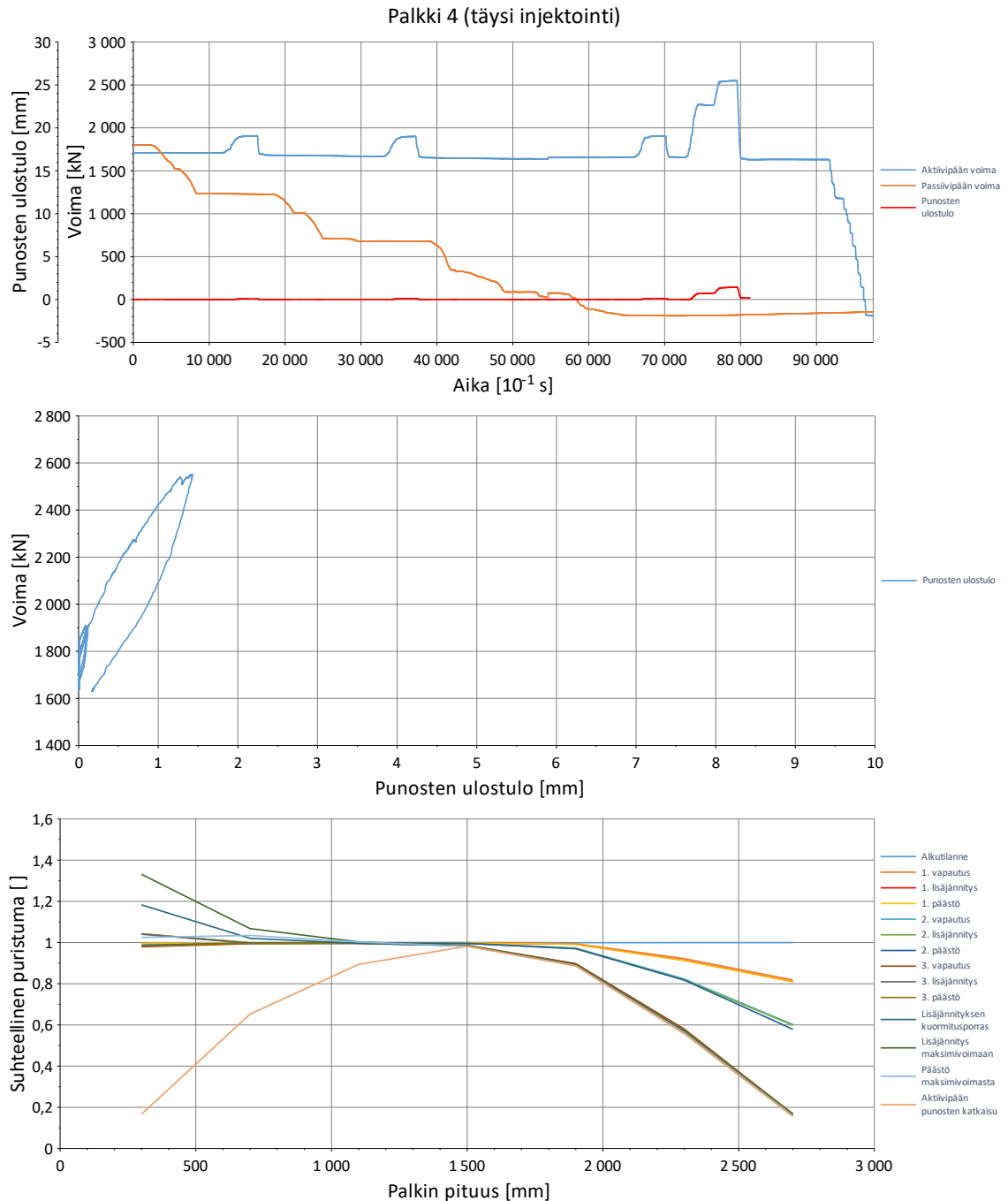
Palkin 1 vapautuskokeessa vapautusjärjestelmä toimi normaalisti, jännepunokset vapautuivat passiivipäästä ja voiman arvot putosivat odotetun määrän jokaisella vapautuksella. Aktiivipäässä jännepunosten ulostulo lisäjännityksillä oli pientä ja palautui suurimmaksi osaksi päästössä.

Ennen maksimivoimaan lisäjännittämistä passiivipään jännepunokset katkaistiin polttoleikkaamalla. Maksimivoimaan lisäjännittäminen toteutettiin kuormitussuunnitelman mukaan. Aktiivipään jännepunokset katkaistiin polttoleikkaamalla kokeen lopuksi. Puristumakuvaajasta nähdään passiivipään vapautuksia vastaavat puristuman pienenemiset ja aktiivipään lisäjännityksiä vastaavat puristuman kasvut sekä jänteiden katkaisusta aiheutuva pursituman pieneneminen.

Punosten katkaiseminen polttoleikkaamalla lämmitti myös jännitysjakkaraa mikä todennäköisesti aiheutti virhettä voiman arvoon. Suurien voimien vapauttaminen muilla keinoin todettiin kuitenkin liian vaaralliseksi.

## Palkki 4, täysi injektointi

Palkin 4 ankkurointikokeessa jännepunoksiin ankkuroitiin aktiivipäästä mitattuna 1815 kN jännevoima. Injektointi onnistui hyvin.



**Kuvaaja 4.4** Palkin 4 vapautuskokeen tulokset. Vapautuskokeen voimakäyrät, sekä punoksen aktiivipään ulostulo (yllä). Jännepunosten ulostulo aktiivipäässä voiman suhteen vapautuskokeen aikana (keskellä). Vapautuskokeen puristuman suhteelliset arvot palkin matkalla kokeen eri vaiheissa (alla), aktiivipää vasen, passiivipää oikea.

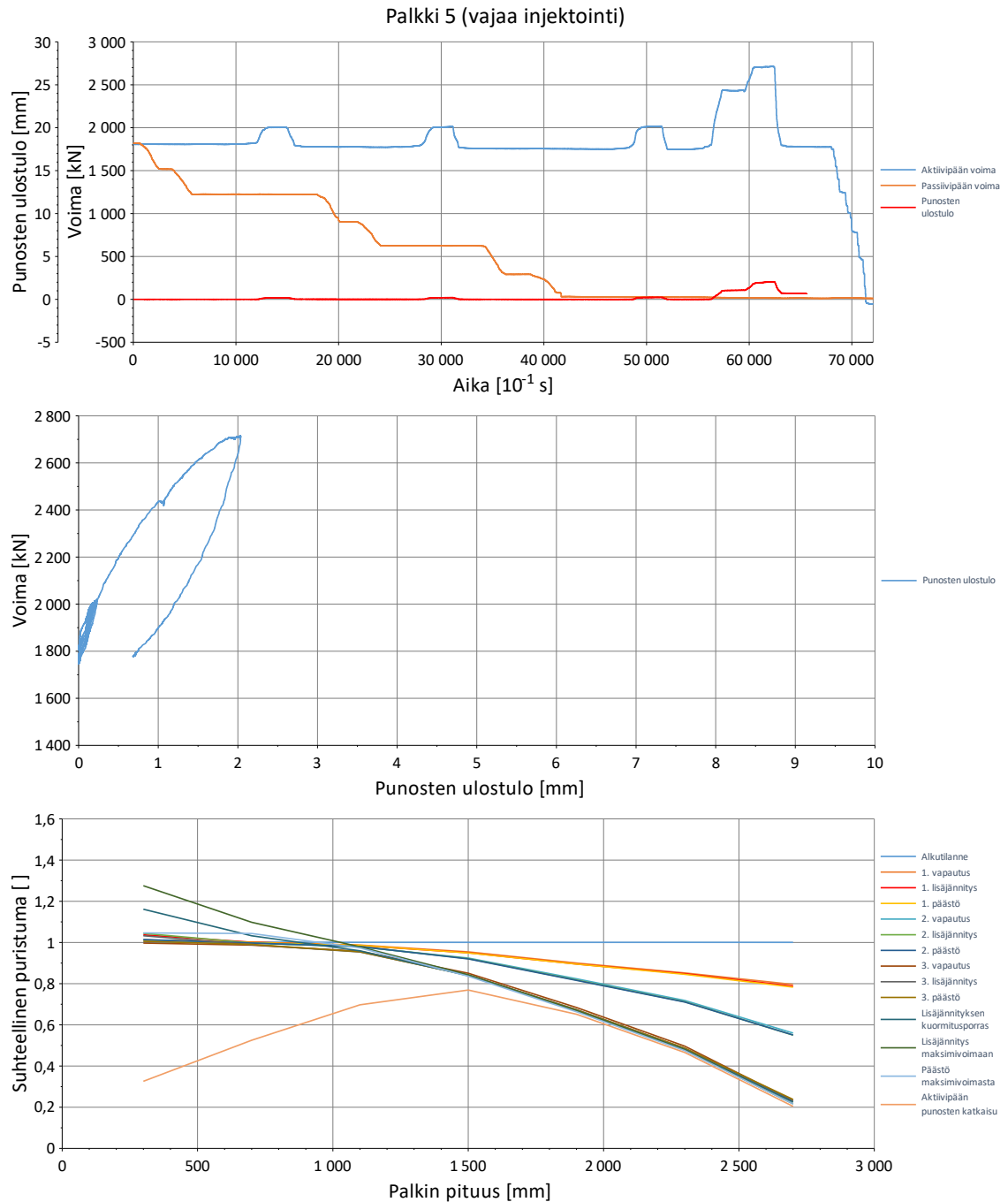
Palkin 4 vapautuskokeessa kaikki jännepunokset eivät vapautuneet täysin (punokset 4 ja 5) ja passiivipään punokset jouduttiin katkaisemaan polttoleikkaamalla. Voimakuvaajasta huomataan voiman arvon menneen punoksia katkaistaessa reilusti negatiiviseksi. Tämä aiheutui luultavasti jännitysjakkaran lämpenemisestä. Muutoin kuormitus tapahtui kuormitussuunnitelman mukaisesti.

#### **Palkit 1-4, yhteenveto**

Palkeilla 1-4 kokeet sujuivat pääsääntöisesti hyvin. Palkeilla 2 ja 3 jännepunokset eivät vapautuneet täysin, mutta viimeinen vapautus (punosten katkaisu) näyttää uudelleenankkuroitumispituuden, kun kaikki punokset ovat vapautuneet. Palkeilla 1 ja 4 punokset vapautuivat täysin, joten tuloksista voidaan nähdä uudelleenankkurointipituuden kehittyminen, kun lisää punoksia vapautetaan.

### Palkki 5, vajaa injektointi

Palkin 5 ankkurointikokeessa jännepunoksiin ankkuroitiin aktiivipäästä mitattuna 1809 kN jännevoima. Injektointi onnistui hyvin.

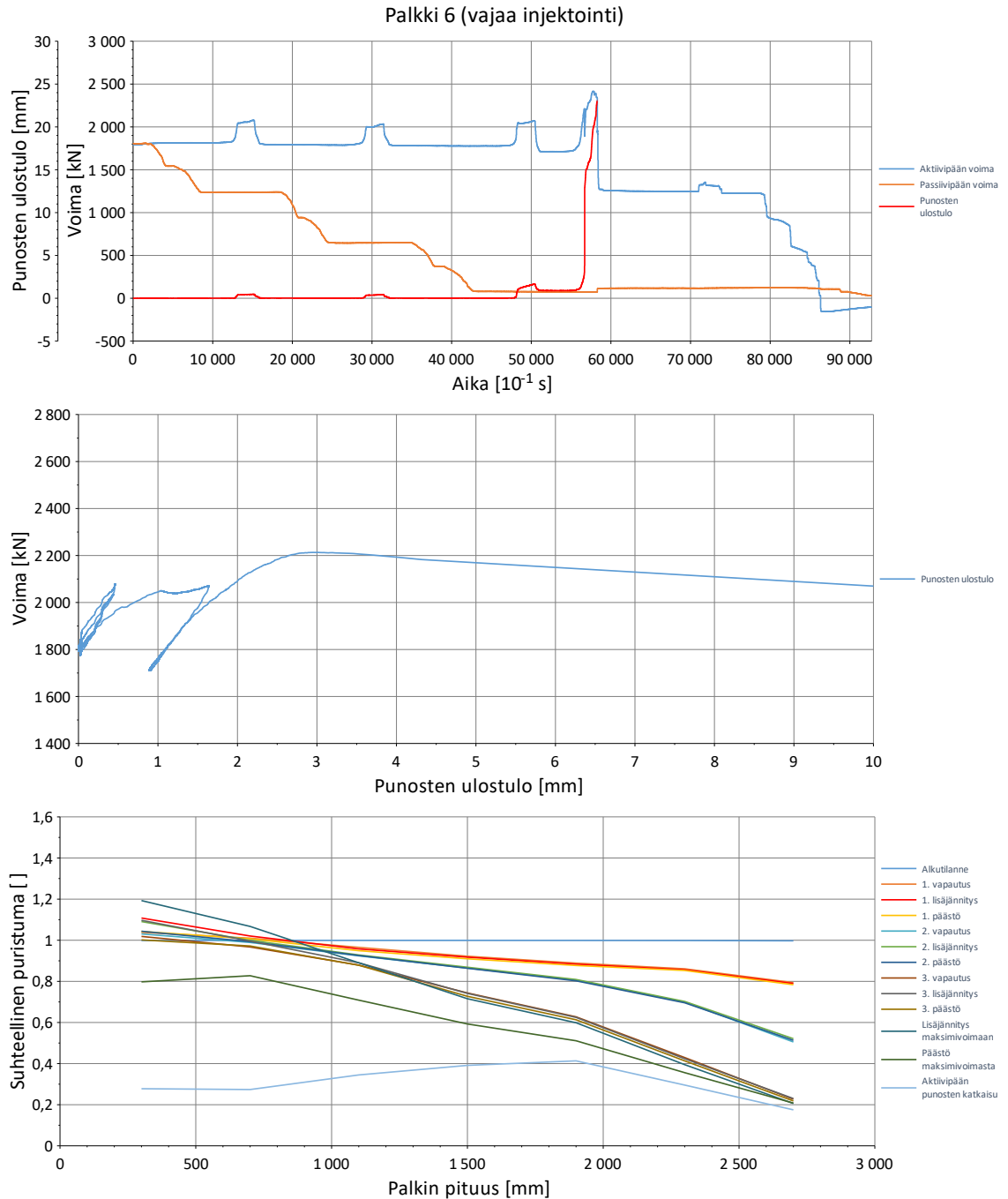


**Kuvaaja 4.5** Palkin 5 vapautuskokeen tulokset. Vapautuskokeen voimakäyrät, sekä punoksen aktiivipään ulostulo (yllä). Jännepunosten ulostulo aktiivipäässä voiman suhteen vapautuskokeen aikana (keskellä). Vapautuskokeen puristuman suhteelliset arvot palkin matkalla kokeen eri vaiheissa (alla), aktiivipää vasen, passiivipää oikea.

Vapautuskokeessa kaikki punokset vapautuivat täysin. Lisäjännityksillä ei tapahtunut pysyvää muutosta punosten ulostulossa. Ennen maksimivoimaan lisäjännittämistä passiivipään jännepunokset katkaistiin polttoleikkaamalla. Maksimivoimaan lisäjännittäessä punosten ulostulossa tapahtui pieni pysyvä muutos ja päästössä voima palautui. Aktiivipään jännepunokset katkaistiin polttoleikkaamalla kokeen lopuksi.

## Palkki 6, vajaa injektointi

Palkin 6 ankkurointikokeessa jännepunoksiin ankkuroitiin aktiivipäästä mitattuna 1782 kN jännevoima. Jännityksen aikana aktiivipään sirppipala putosi paikoiltaan. Injektointi onnistui hyvin.



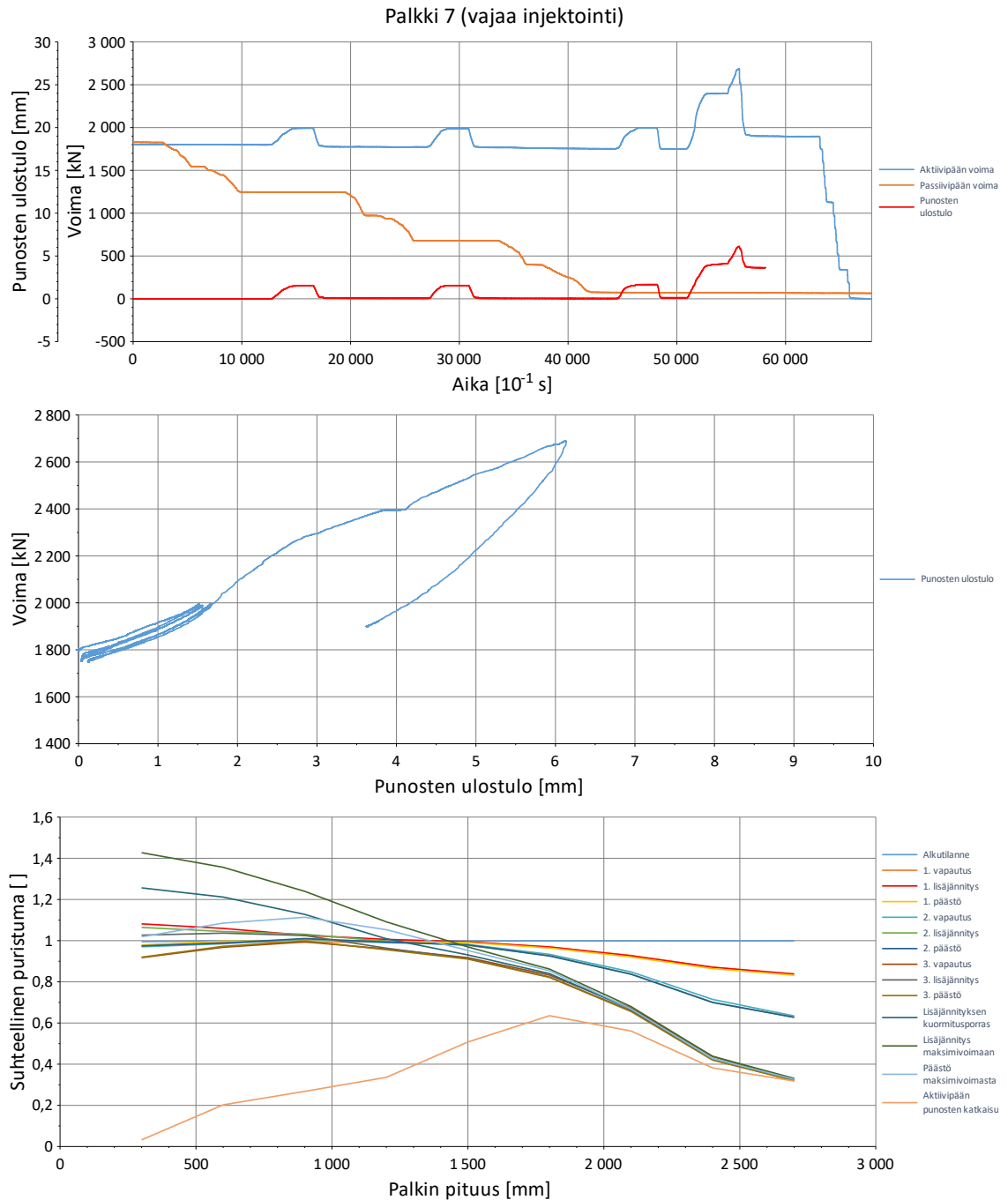
**Kuvaaja 4.6** Palkin 6 vapautuskokeen tulokset. Vapautuskokeen voimakäyrät, sekä punoksen aktiivipään ulostulo (yllä). Jännepunosten ulostulo aktiivipäässä voiman suhteen vapautuskokeen aikana (keskellä). Vapautuskokeen puristuman suhteelliset arvot palkin matkalla kokeen eri vaiheissa (alla), aktiivipää vasen, passiivipää oikea.



Vapautuskokeessa jännepunokset vapautuivat täysin. Kolmannella lisäjännityksellä tapahtui punosten liukumaa. Maksimivoimaan lisäjännittäessä jännepunosten ulostulo kasvoi hallitsemattomasti ja osa jännepunoksista katkeili. Tämä näkyi myös puristumakuvaajasta, maksimivoiman päästön puristumat ovat pudonneet myös aktiivipäässä ja palkin keskellä. Aktiivipään jännepunokset katkaistiin polttoleikkaamalla kokeen lopuksi, jolloin puristuman arvot putosivat koko palkin matkalta.

## Palkki 7, vajaa injektointi

Palkin 7 ankkurointikokeessa jännepunoksiin ankkuroitiin aktiivipäästä mitattuna 1780 kN jännevoima. Injektointi ei onnistunut täydellisesti palkin aktiivipäässä.

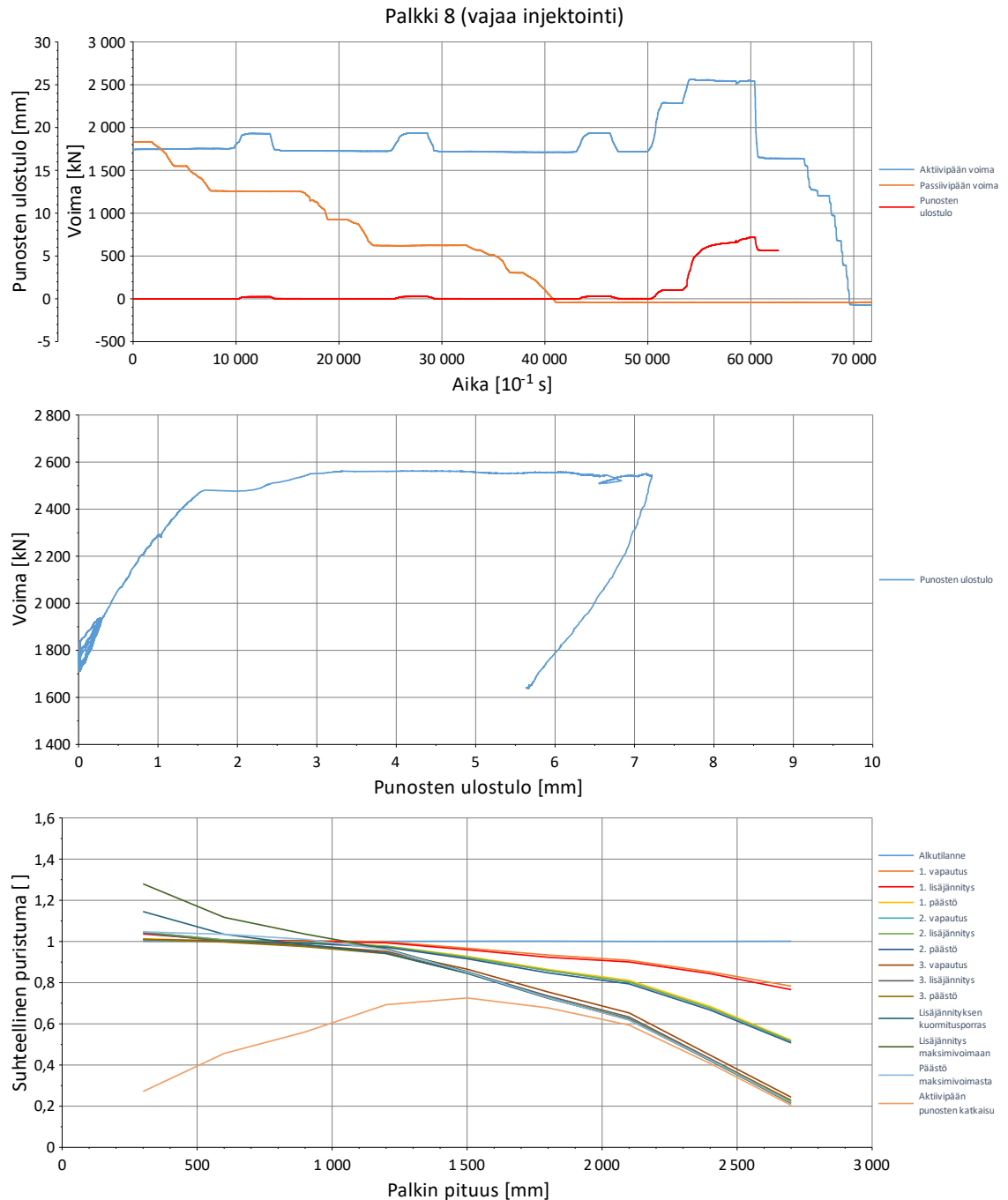


**Kuvaaja 4.7** Palkin 7 vapautuskokeen tulokset. Vapautuskokeen voimakäyrät, sekä punoksen aktiivipään ulostulo (yllä). Jännepunosten ulostulo aktiivipäässä voiman suhteen vapautuskokeen aikana (keskellä). Vapautuskokeen puristuman suhteelliset arvot palkin matkalla kokeen eri vaiheissa (alla), aktiivipää vasen, passiivipää oikea.

Vapautuskokeessa kaikki jännepunokset vapautuivat täysin. Lisäjännityksillä ei tapahtunut punosten liukumaa. Maksimivoimaan lisäjännittäessä tapahtui punosten liukumaa ja päästettäessä aktiivipään voima palautui lähes kokonaan. Maksimivoiman lisäjännityksen pitoa ei toteutettu.

## Palkki 8, vajaa injektointi

Palkin 8 ankkurointikokeessa jännepunoksiin ankkuroitiin aktiivipäästä mitattuna 1780 kN jännevoima. Injektointi onnistui hyvin.



**Kuvaaja 4.8** Palkin 8 vapautuskokeen tulokset. Vapautuskokeen voimakäyrät, sekä punoksen aktiivipään ulostulo (yllä). Jännepunosten ulostulo aktiivipäessä voiman suhteen vapautuskokeen aikana (keskellä). Vapautuskokeen puristuman suhteelliset arvot palkin matkalla kokeen eri vaiheissa (alla), aktiivipää vasen, passiivipää oikea.

Vapautuskokeessa kaikki punokset vapautuivat täysin. Lisäjännityksillä ei tapahtunut punosten liukumaa. Maksimivoiman lisäjännityksellä tapahtui merkittävää punosten liukumaa ja yhdestä punoksesta katkesi lanka. Aktiivipään voima palautui maksimivoiman päästöllä. Aktiivipään jännepunokset katkaistiin polttoleikkaamalla kokeen lopuksi.

### **Palkit 5-8, yhteenveto**

Palkeilla 5-8 kokeet sujuivat pääsääntöisesti hyvin. Palkin 6 kohdalla palkin pään sirppipala lähti pois paikoiltaan, mikä aiheuttaisi päällimmäisten punosten painautumisen suojaputken yläpintaan ja solumuoviseen suojaputkitäytteeseen. Tartunnan voidaan tällöin olettaa olevan huonompi päällimmäisissä punoksissa. Kaikilla palkeilla punokset vapautuivat täysin.

#### 4.4.4 Palkit 9-16

Palkkien 1-4 perusteella täysin injektoidun koekappaleen pituudeksi määritettiin 1230 mm. Palkkien 5-8 perusteella vajaasti injektoitujen koekappaleiden pituudeksi määritettiin 1700 mm. Kokeissa päästiin tavoitteeseen eli punosten ankkurointi saatiin pettämään. Tästä johtuen lisäkuormituksien tasoa ei laskettu alkuperäisestä ankkurointijännevoimasta (kaava 4.3) vaan ennen lisäkuormitusta vallitsevasta aktiivipään voimasta (kaava 4.4) vielä vapauttamattomien jännepunosten katkeilun estämiseksi.

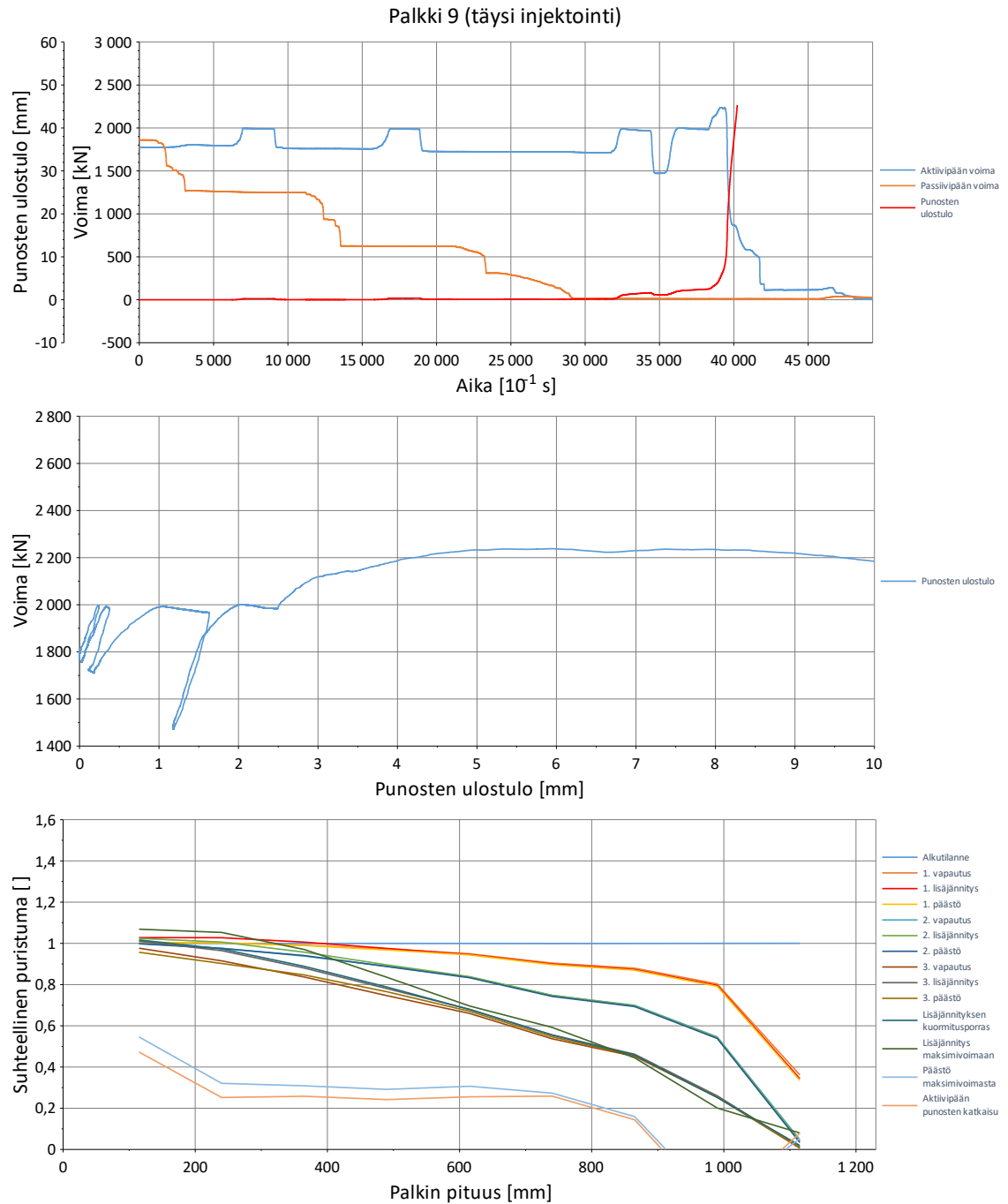
$$F_{\text{lisa}} = F_0 + \Delta F \quad (4.3)$$

$$F_{\text{lisa}} = F + \Delta F \quad (4.4)$$

joissa	$F_{\text{lisa}}$	on lisäjännityksen kokonaisvoima,
	$F_0$	on aktiivipään voima vapautuskokeen alussa,
	$F$	on aktiivipään voima ennen lisäjännitystä ja
	$\Delta F$	on voiman lisäjännitysvoima.

## Palkki 9, täysi injektointi

Palkin 9 ankkurointikokeessa jännepunoksiin ankkuroitiin aktiivipäästä mitattuna 1817 kN jännevoima. Injektointi onnistui hyvin.



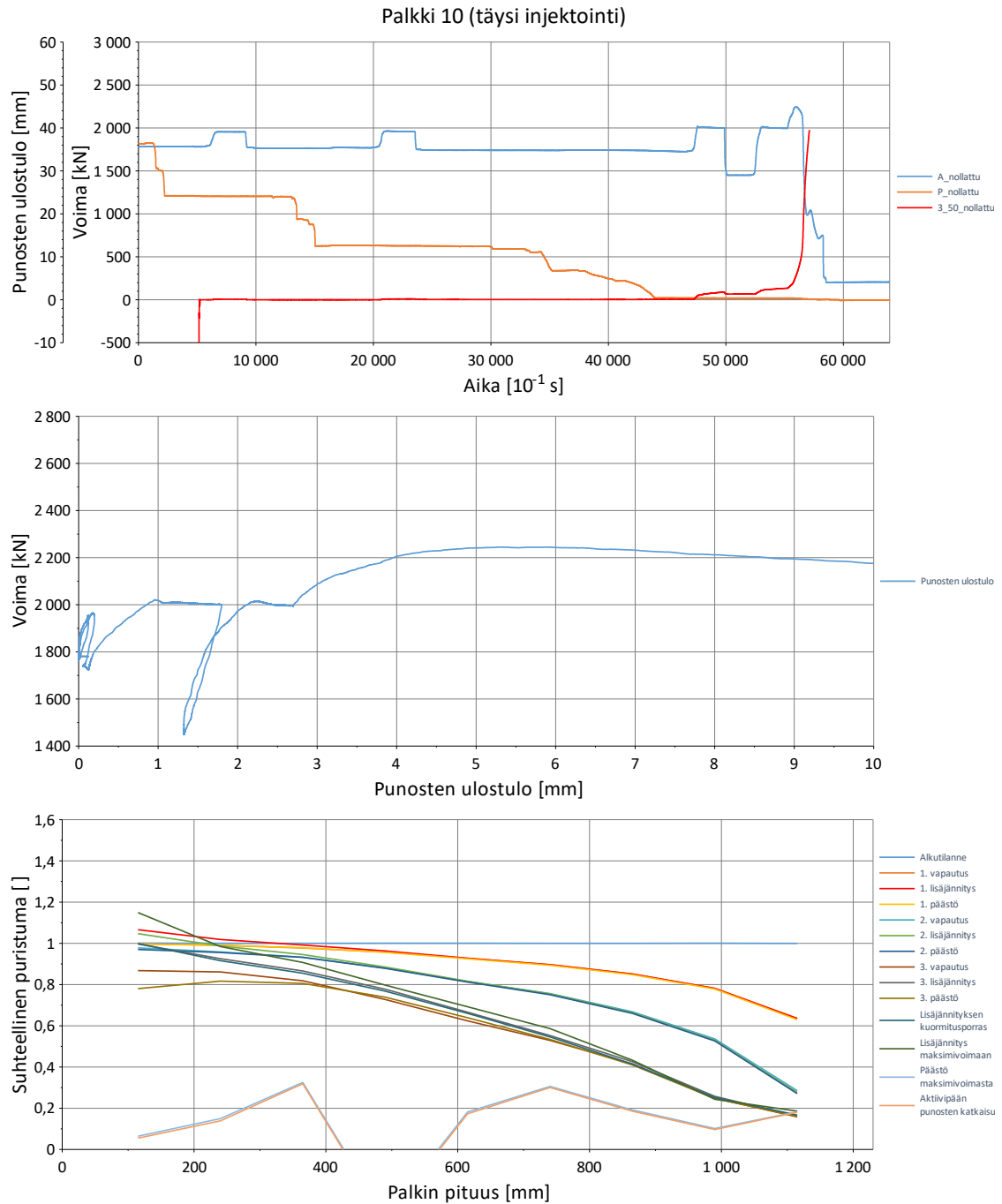
**Kuvaaja 4.9** Palkin 9 vapautuskokeen tulokset. Vapautuskokeen voimakäyrät, sekä punoksen aktiivipään ulostulo (yllä). Jännepunosten ulostulo aktiivipäessä voiman suhteen vapautuskokeen aikana (keskellä). Vapautuskokeen puristuman suhteelliset arvot palkin matkalla kokeen eri vaiheissa (alla), aktiivipää vasen, passiivipää oikea.

Vapautuskokeessa jännepunosten vapautus onnistui, eli jännepunokset vapautuivat täysin. Kolmannella lisäjännityksellä huomataan punosten ulostulossa pysyvää muutosta. Maksimivoimaan lisäjännittäessä punosten ulostulo kasvoi hallitsemattomasti ja aktiivipään voima putosi lähes nolleen. Jännepunosten uudelleenankkuroituminen siis petti ja jännepunokset irtosivat palkin matkalta. Maksimivoiman päästöllä betonin puristuma putosi koko palkin matkalta. Aktiivipään jännepunokset katkaistiin kokeen lopuksi katkaisulaikalla, jolloin puristuman arvot putosivat hyvin vähän.



## Palkki 10, täysi injektointi

Palkin 10 ankkurointikokeessa jännepunoksiin ankkuroitiin aktiivipäästä mitattuna 1806 kN jännevoima. Injektointi onnistui hyvin.

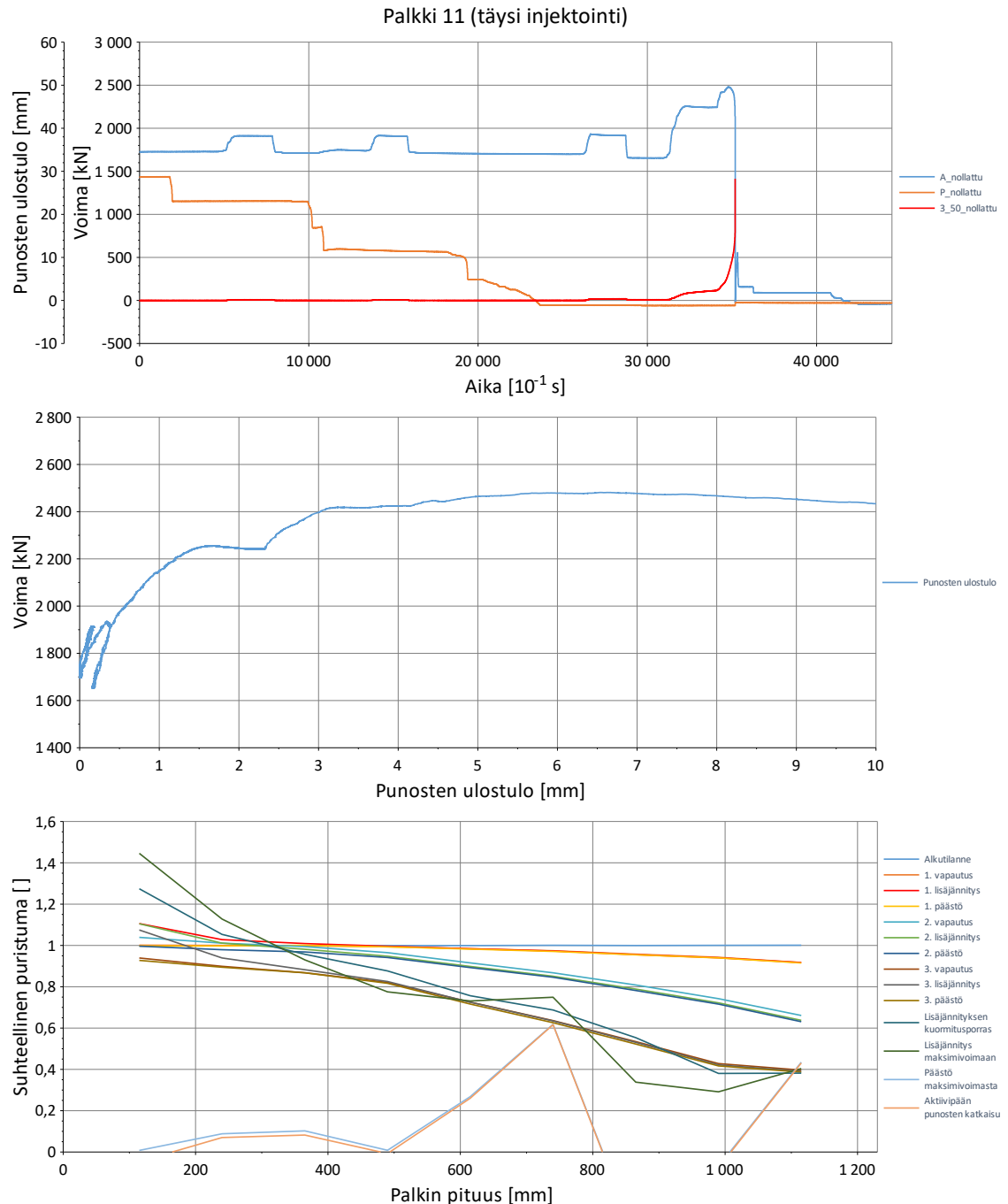


**Kuvaaja 4.10** Palkin 10 vapautuskokeen tulokset. Vapautuskokeen voimakäyrät, sekä punoksen aktiivipään ulostulo (yllä). Jännepunosten ulostulo aktiivipäässä voiman suhteen vapautuskokeen aikana (keskellä). Vapautuskokeen puristuman suhteelliset arvot palkin matkalla kokeen eri vaiheissa (alla), aktiivipää vasen, passiivipää oikea.

Vapautuskokeessa jännepunosten vapautus onnistui, eli jännepunokset vapautuivat täysin. Kolmannella lisäjännityksellä huomataan punosten ulostulossa pysyvää muutosta. Maksimivoimaan lisäjännittäessä punosten ulostulo kasvoi hallitsemattomasti ja aktiivipään voima putosi. Maksimivoiman päästöissä puristumat putosivat koko palkin matkalta. Yksi venymä-anturi näyttää betonin joutuneen vedolle. Aktiivipään jännepunokset katkaistiin katkaisulaikalla kokeen lopuksi, jolloin puristuman arvot eivät enää pienentyneet.

## Palkki 11, täysi injektointi

Palkin 11 ankkurointikokeessa jännepunoksiin ankkuroitiin aktiivipäästä mitattuna 1788 kN jännevoima. Injektointi onnistui hyvin.

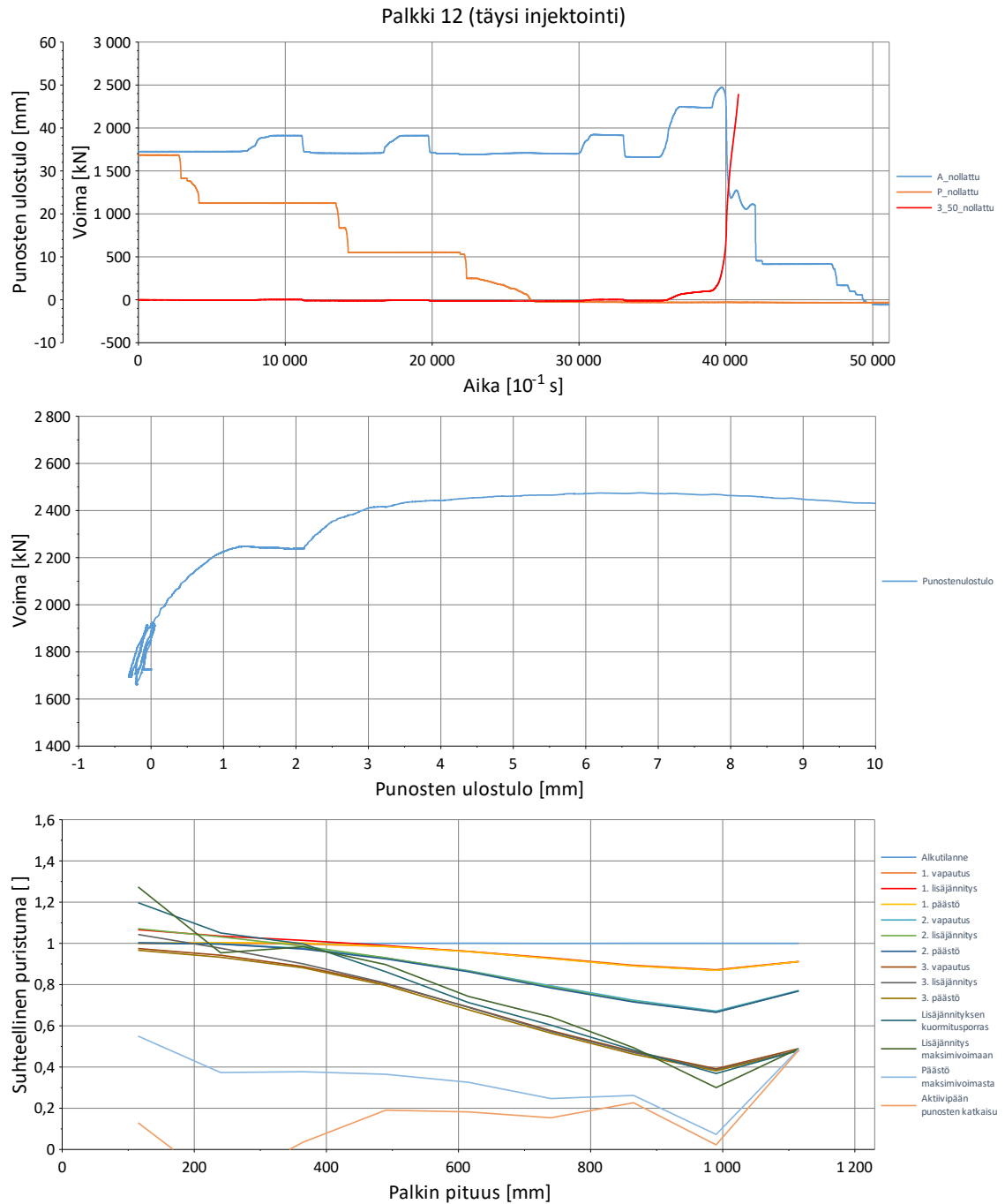


**Kuvaaja 4.11** Palkin 11 vapautuskokeen tulokset. Vapautuskokeen voimakäyrät, sekä punoksen aktiivipään ulostulo (yllä). Jännepunosten ulostulo aktiivipäässä voiman suhteen vapautuskokeen aikana (keskellä). Vapautuskokeen puristuman suhteelliset arvot palkin matkalla kokeen eri vaiheissa (alla), aktiivipää vasen, passiivipää oikea.

Vapautuskokeessa jännepunokset vapautuivat täysin. Jännepunokset 1 ja 2 vapautettiin vahingossa ennen mittauksen käynnistämistä, mikä huomataan alentuneena voiman arvona vapautuskokeen alussa. Kolmannella lisäjännityksellä huomataan punosten ulostulossa pientä pysyvää muutosta. Maksimivoimaan lisäjännittäessä palkista kuului pamahdus, ilmeisesti jännepunoksen katketessa palkin sisällä. Punosten ulostulo kasvoi hallitsemattomasti ja aktiivipään voima putosi lähes nolleen. Maksimivoiman puristumakäyrässä nähdään omituinen puristuman kasvu, mikä saattaa johtua punoksen katkeamisesta. Maksimivoiman päästöllä puristuma laski aktiivipäässä ja yhden liuskan arvo putosi negatiiviseksi eli betoniin kohdistui vetoa. Aktiivipään jännepunokset katkaistiin kokeen lopuksi katkaisulaikalla.

## Palkki 12, täysi injektointi

Palkin 12 ankkurointikokeessa jännepunoksiin ankkuroitiin aktiivipäästä mitattuna 1785 kN jännevoima. Injektointi onnistui hyvin.



**Kuvaaja 4.12** Palkin 12 vapautuskokeen tulokset. Vapautuskokeen voimakäyrät, sekä punoksen aktiivipään ulostulo (yllä). Jännepunosten ulostulo aktiivipäässä voiman suhteen vapautuskokeen aikana (keskellä). Vapautuskokeen puristuman suhteelliset arvot palkin matkalla kokeen eri vaiheissa (alla), aktiivipää vasen, passiivipää oikea.

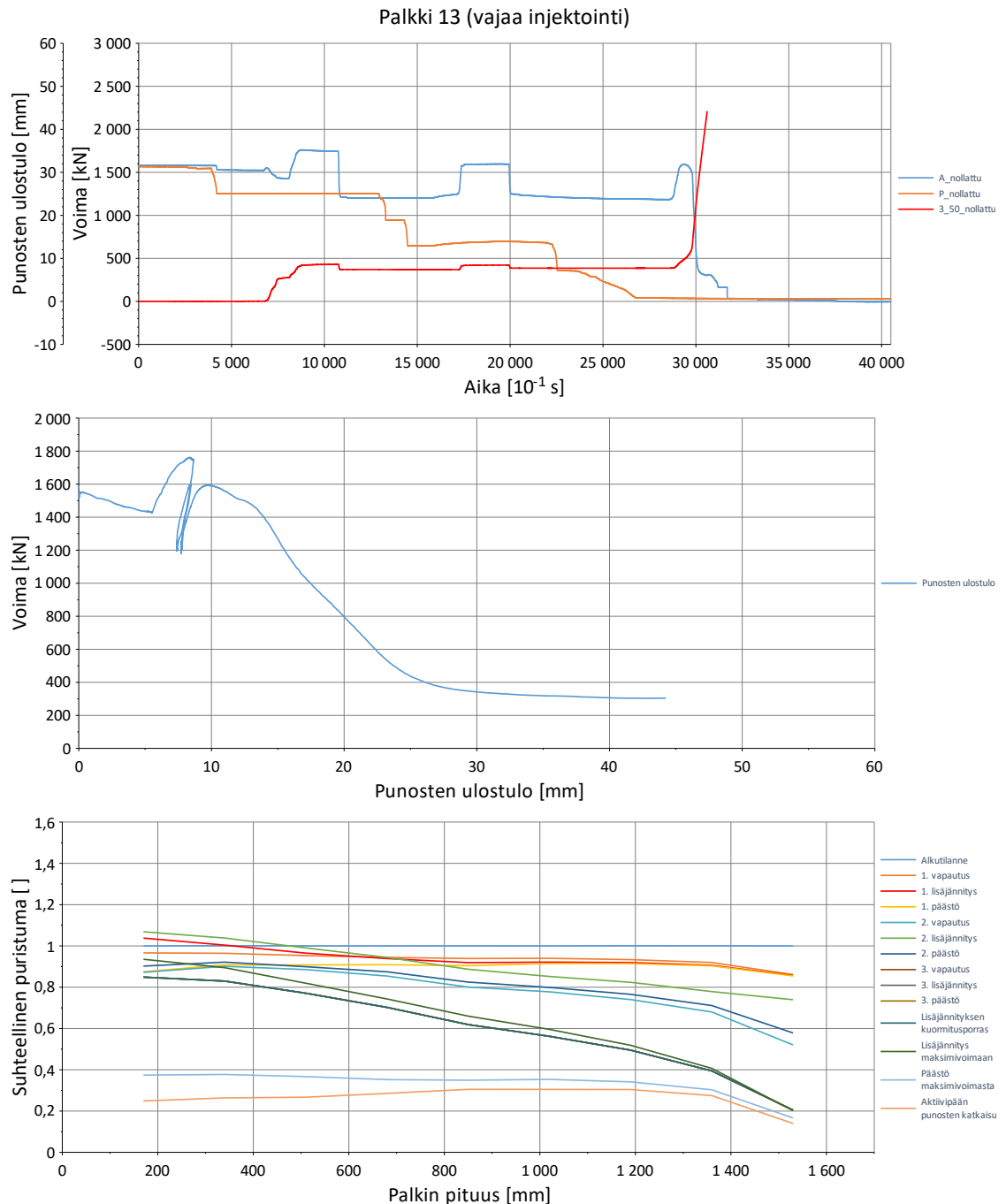
Vapautuskokeessa jännepunokset vapautuivat täysin. Lisäjännityksillä ei tapahtunut jännepunosten liukumaa. Maksimivoimaan lisäjännittäessä punosten ulostulo kasvoi hallitsemattomasti ja aktiivipään voima putosi huomattavasti. Maksimivoiman päästöllä betonin puristuma pieneni koko palkin matkalta. Lopuksi aktiivipään punokset katkaistiin katkaisulaikalla, jolloin puristuman arvot pienenivät.

### **Palkit 9-12, yhteenveto**

Palkkien 9-12 kuormituskokeet poikkesivat aiemmista lisäjännityksen osalta. Jännepunosten ankkuroituminen saatiin pettämään lisäjännittämällä kaikilla koekappaleilla, eli uudelleenankkuroitumispituus ja lisävoiman tartuntapituus leikkasivat toisensa. Kaikki jännepunokset vapautuivat täysin.

### Palkki 13, vajaa injektointi

Palkin 13 ankkurointikokeessa jännepunoksiin ankkuroitiin aktiivipäästä mitattuna 1787 kN jännevoima. Injektointi onnistui hyvin. Palkin molempien päiden sirppipala puuttui kokeen aikana, joten päällimmäiset jännepunokset pääsivät todennäköisesti painautumaan suojaputkessa ylöspäin solumuovia vasten.



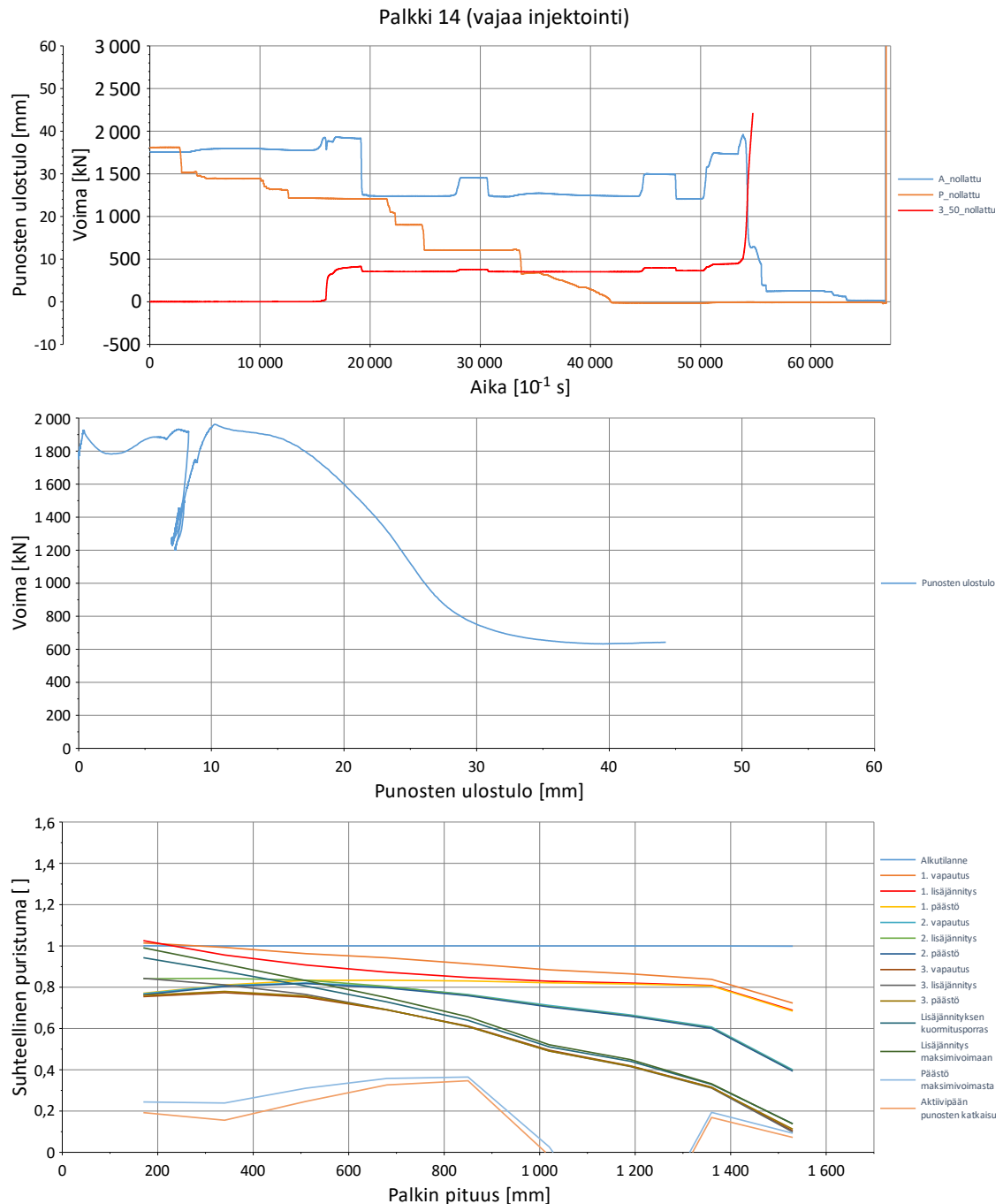
**Kuvaaja 4.13** Palkin 13 vapautuskokeen tulokset. Vapautuskokeen voimakäyrät, sekä punoksen aktiivipään ulostulo (yllä). Jännepunosten ulostulo aktiivipäässä voiman suhteen vapautuskokeen aikana (keskellä). Vapautuskokeen puristuman suhteelliset arvot palkin matkalla kokeen eri vaiheissa (alla), aktiivipää vasen, passiivipää oikea.

Vapautuskokeessa kaikki jännepunokset vapautuivat. Punokset 1 ja 2 vapautettiin vahingossa ennen mittauksen aloittamista. Mittauksen alkaessa huomataan myös aktiivipään voiman pudonneen passiivipään tasolle. Ensimmäisellä lisäjännityksellä punosten ulostulossa tapahtui pysyvää muutosta ja päästössä aktiivipään voima putosi jälleen passiivipään tasolle. Kolmannella lisäkuormituksella punosten ulostulo kasvoi hallitsemattomasti ja aktiivipään voima putosi. Maksimivoiman päästöllä betonin puristuma pienentyi tasaiseksi koko palkin matkalta, mikä viittaisi jännepunosten irronneen koko palkin matkalta. Lopuksi aktiivipään punokset katkaistiin katkaisulaikalla, jolloin betonin puristuma pieneni hieman.



### Palkki 14, vajaa injektointi

Palkin 14 ankkurointikokeessa jännepunoksiin ankkuroitiin aktiivipäästä mitattuna 1785 kN jännevoima. Injektointi onnistui hyvin. Palkin molempien päiden sirppipala puuttui kokeen aikana, joten päällimmäiset jännepunokset pääsivät todennäköisesti painautumaan suojaputkessa ylöspäin solumuovia vasten.

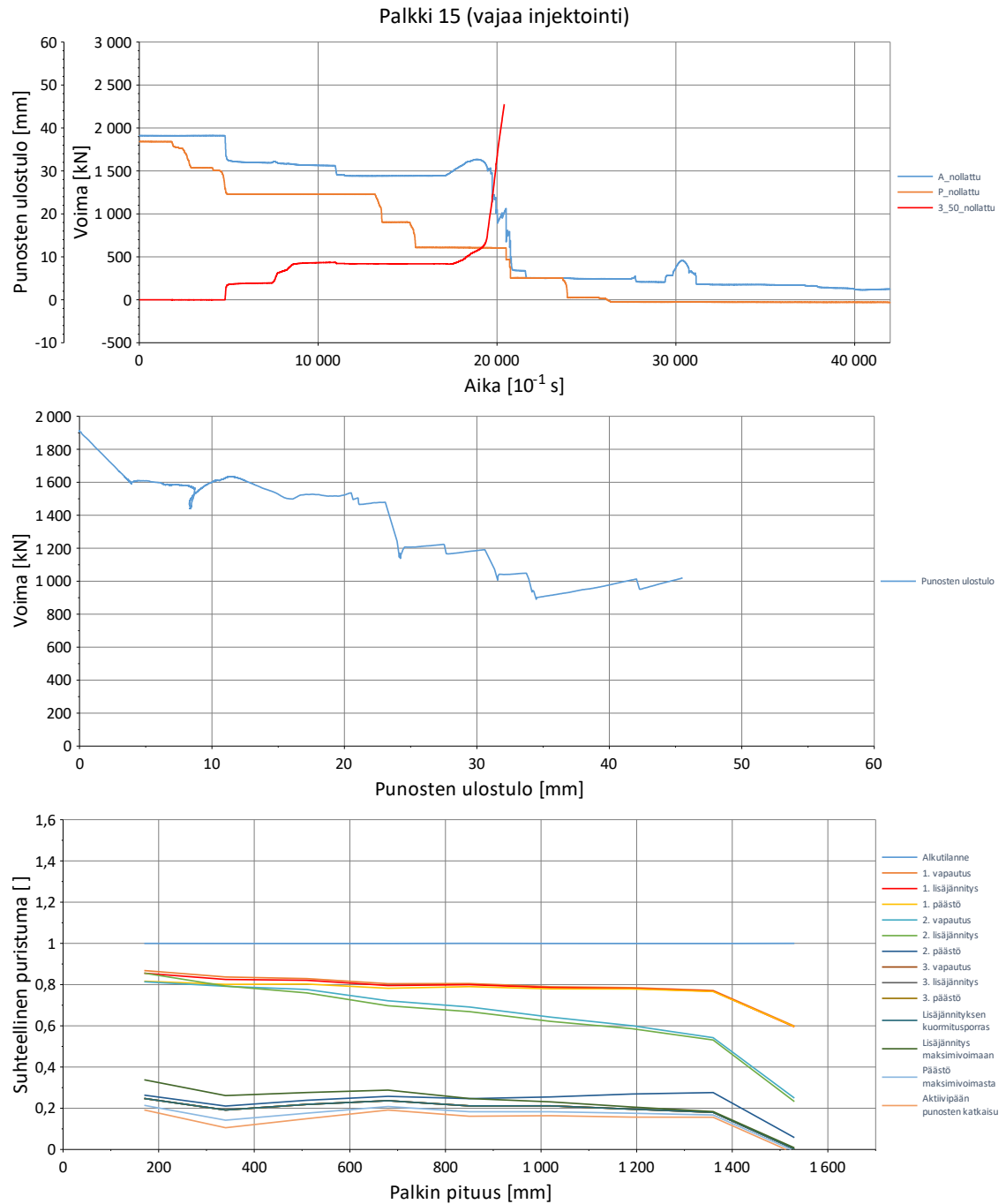


**Kuvaaja 4.14** Palkin 14 vapautuskokeen tulokset. Vapautuskokeen voimakäyrät, sekä punoksen aktiivipään ulostulo (yllä). Jännepunosten ulostulo aktiivipäässä voiman suhteen vapautuskokeen aikana (keskellä). Vapautuskokeen puristuman suhteelliset arvot palkin matkalla kokeen eri vaiheissa (alla), aktiivipää vasen, passiivipää oikea.

Vapautuskokeessa kaikki jännepunokset vapautuivat täysin. Ensimmäisellä lisäjännityksellä tapahtui punosten ulostuloa ja päästössä aktiivipään voima putosi passiivipään tasolle. Maksimivoimaan lisäjännittäessä punosten ulostulo kasvoi hallitsemattomasti ja voiman arvo putosi. Maksimivoiman päästössä betonin puristuma putosi koko palkin matkalta, mikä viittaisi jännepunosten irronneen koko palkin matkalta. Yksi venymäliuskoista näytti betonin joutuneen vedolle. Lopuksi aktiivipään jännepunokset katkaistiin, jolloin betonin puristumat pienenivät hieman.

## Palkki 15, vajaa injektointi

Palkin 15 ankkurointikokeessa jännepunoksiin ankkuroitiin aktiivipäästä mitattuna 1783 kN jännevoima. Injektointi onnistui hyvin.



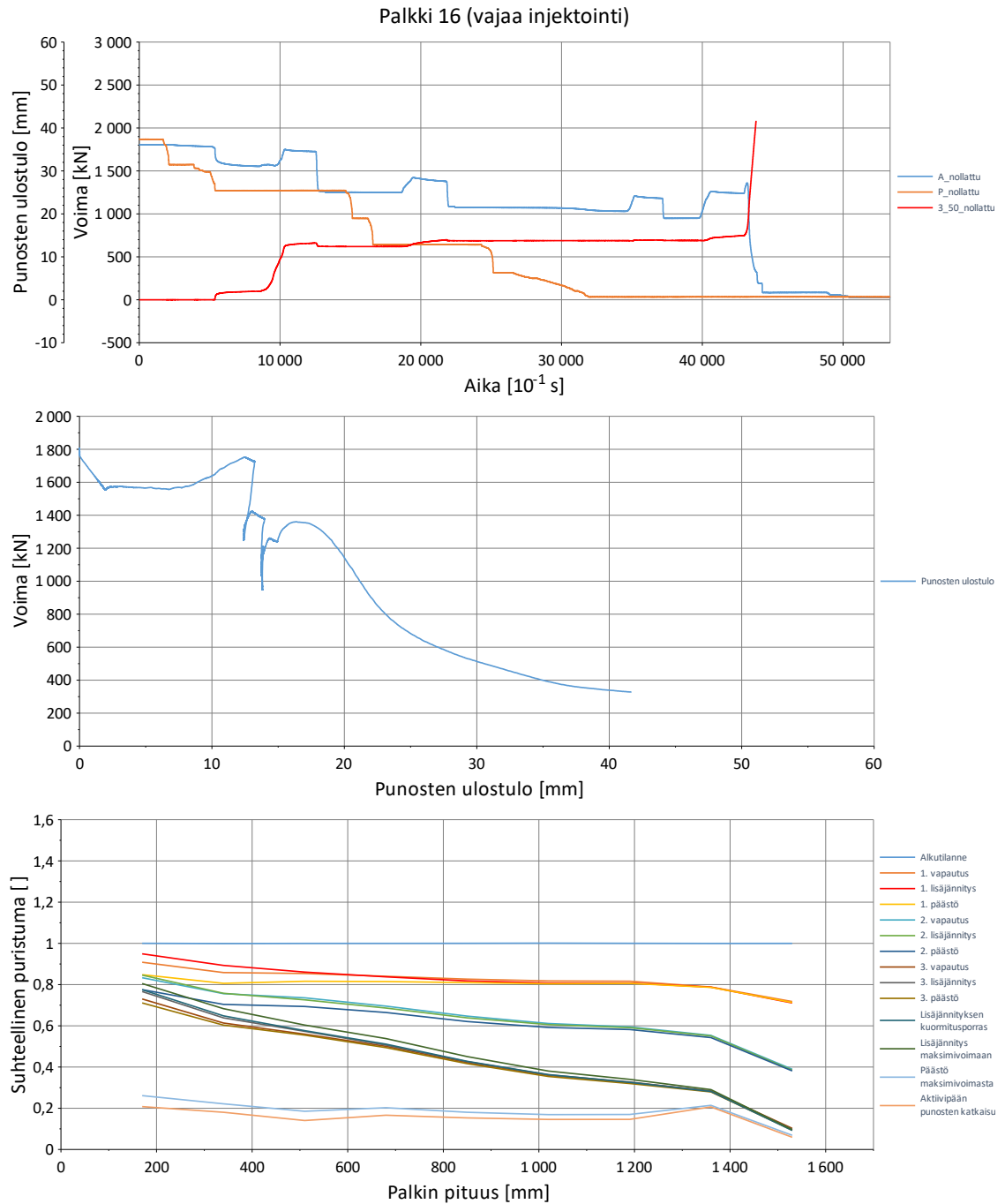
**Kuvaaja 4.15** Palkin 15 vapautuskokeen tulokset. Vapautuskokeen voimakäyrät, sekä punoksen aktiivipään ulostulo (yllä). Jännepunosten ulostulo aktiivipäässä voiman suhteen vapautuskokeen aikana (keskellä). Vapautuskokeen puristuman suhteelliset arvot palkin matkalla kokeen eri vaiheissa (alla), aktiivipää vasen, passiivipää oikea.

Vapautuskokeessa kaikki jännepunokset vapautuivat täysin. Jännevoimien 3 ja 4 vapautuksessa myös aktiivipään voiman arvo putosi passiivipäätä vastaavan määrän, samalla punosten ulostulossa tapahtui äkillinen kasvu. Ensimmäisellä lisäjännityksellä voimaa ei saatu nousemaan ja jännepunoksissa tapahtui ulostuloa vakiovoimalla. Päästössä aktiivipään voiman pieneni hieman. Toisella lisäjännityksellä punosten ulostulo kasvoi hallitsemattomasti ja jännepunosten lankoja katkeili, samalla passiivipään voima pieneni. Viimeisellä vapautuksella jännepunosten 7 ja 8 voima pieneni vain hieman. Viimeisellä lisäjännityksellä punosten ulostulosta ei ole enää dataa, mutta aktiivipään voiman arvo ei kasvanut 450 kN yläpuolelle. Päästössä voiman arvo pieneni hieman. Lopuksi aktiivipään jännepunokset katkaistiin.

Puristumakuvaajasta huomataan puristuman pudonneen tasaiseksi koko palkin matkalta tilanteissa, joissa palkin päiden voimat vastasivat toisiaan. Tämä viittaisi jännepunosten irronneen koko palkin matkalta.

## Palkki 16, vajaa injektointi

Palkin 16 ankkurointikokeessa jännepunoksiin ankkuroitiin aktiivipäästä mitattuna 1795 kN jännevoima. Injektointi onnistui hyvin.



**Kuvaaja 4.16** Palkin 16 vapautuskokeen tulokset. Vapautuskokeen voimakäyrät, sekä punoksen aktiivipään ulostulo (yllä). Jännepunosten ulostulo aktiivipäessä voiman suhteen vapautuskokeen aikana (keskellä). Vapautuskokeen puristuman suhteelliset arvot palkin matkalla kokeen eri vaiheissa (alla), aktiivipää vasen, passiivipää oikea.

Vapautuskokeessa kaikki jännepunokset vapautuivat täysin. Punosten 3 ja 4 vapautuksella myös aktiivipään voima putosi ja jännepunosten ulostulossa tapahtui kasvu. Ensimmäisellä lisäjännityksellä tapahtui punosten ulostulossa pysyvää muutosta ensin vakiovoimalla, ja sitten voiman kasvaessa. Päästössä aktiivipään voima putosi passiivipään tasolle. Myös toisella lisäjännityksellä tapahtui punosten ulostulossa pysyvää muutosta ja päästöllä voiman pienenemistä. Kolmannella lisäjännityksellä ei punosten ulostulossa tapahtunut pysyvää muutosta, mutta päästössä aktiivipään voima pieneni. Maksimivoimaan lisäjännittäessä punosten ulostulo kasvoi hallitsemattomasti ja aktiivipään voima putosi lähes nolnaan. Lopuksi aktiivipään jännepunokset katkaistiin katkaisulaikalla.

Puristumakuvaajasta huomataan puristuman pudonneen tasaiseksi koko palkin matkalta tilanteissa, joissa palkin päiden voimat vastasivat toisiaan. Tämä viittaisi jännepunosten irronneen koko palkin matkalta.

### **Palkit 13-16, yhteenveto**

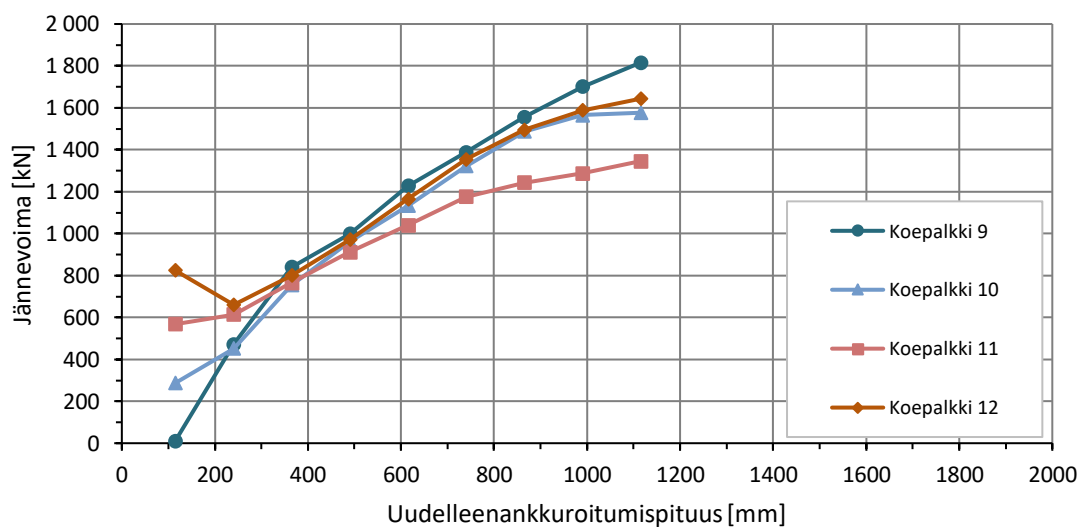
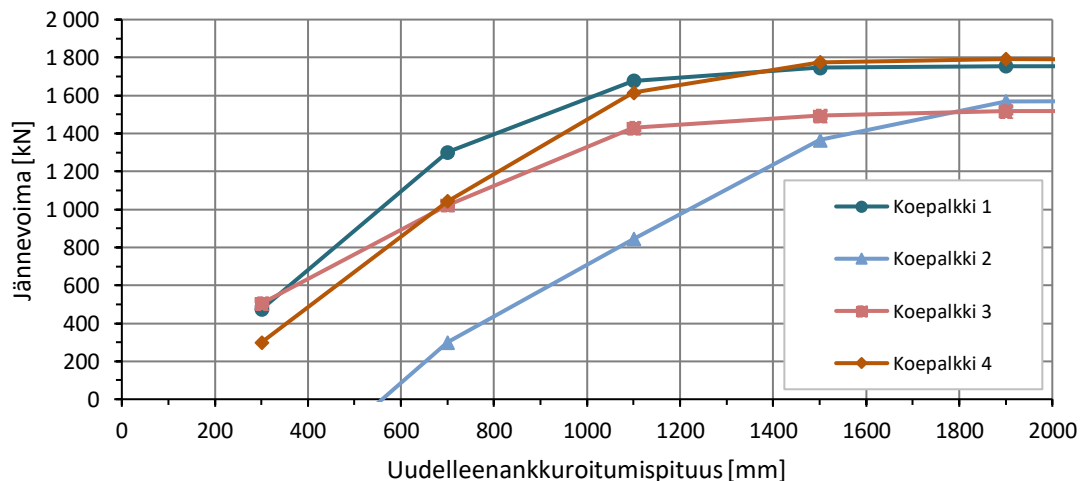
Palkkien 13-16 kokeissa havaittiin jännepunosten uudelleenankkuroitumispiteuden olevan suurempi kuin palkin pituus, jolloin palkin aktiivipäässä tapahtui jännepunosten liukumaa. Varsinkin ylimmät jännepunokset olivat alttiina injektoinnin tyhjätilasta aiheutuvalla tartunnan heikkenemiselle. Päälimmäisten jännepunosten uudelleenankkuroituminen petti viimeistään ensimmäisellä lisäjännityksellä kokonaan tai lähes kokonaan.

## 5. TULOSTEN ANALYYSINTI

### 5.1 Uudelleenankkuroituminen koetulosten perusteella

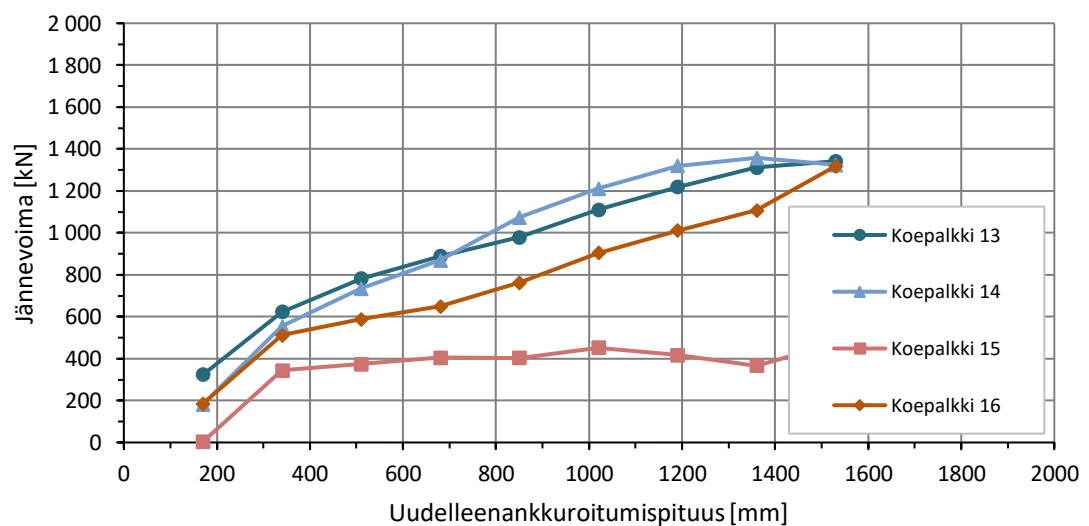
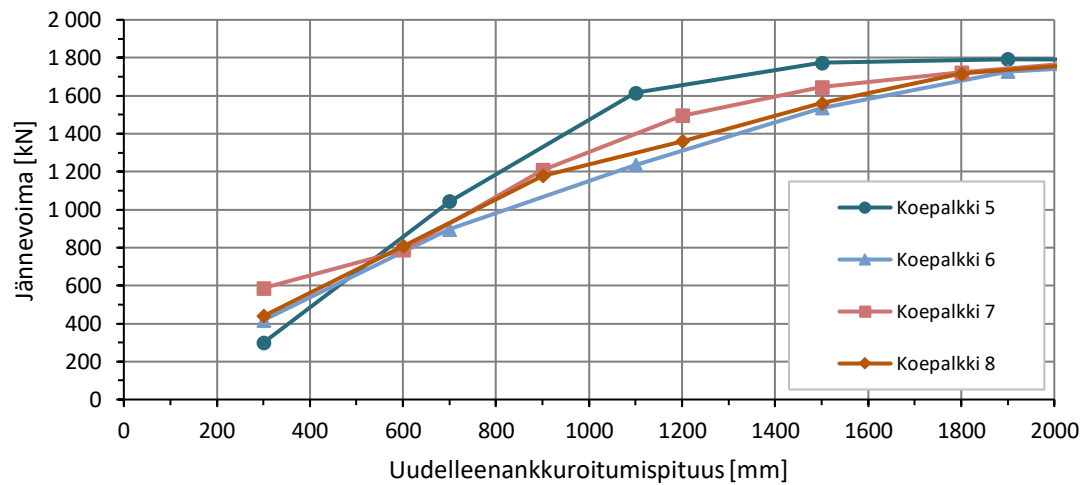
Kuvaajissa 5.1 ja 5.2 on esitetty jännevoiman jakautuminen puristumatuloksista johdettuna, kun kaikki jännepunokset on vapautettu, mutta viimeisiä lisäjännityksiä ei ole vielä suoritettu. Jännevoiman oletettiin muuttuvan suoraviivaisesti betonin puristuman suhteen, jolloin jännevoiman arvo saatiin kertomalla kunkin poikkileikkauksen suhteellisen puristuman arvo aktiivipäästä ennen vapautusta mitatulla voiman arvolla. Koekappaleet on jaoteltu koesarjoittain.

Jännepunoksen uudelleenankkuroituminen täydellä injektoinnilla



Kuvaaja 5.1 Koekappaleiden 1-4 ja 9-12 jännevoiman uudelleenankkuroituminen.

### Jännepunoksen uudelleenankkuroituminen vajaalla injektoinnilla



**Kuvaaja 5.2** Koekappaleiden 5-8 ja 13-16 jännevoiman uudelleenankkuroituminen.

Kuvaajista huomataan vastaavien koekappaleiden uudelleenankkuroitusvoimien vastaavan pääsääntöisesti toisiaan. Kaikilla koekappaleilla lukuun ottamatta koekappaleita 2 ja 3 jännevoima oli alkutilanteessa noin 1800 kN, mikä vastasi 1000 MPa jännitystä. Jakautumat lähenevät odotetusti voiman arvoa nolla palkin päätä lähestyttäessä. Vajaan injektoinnin lyhyillä koepalkeilla jännevoiman huomataan pudonneen koko palkin matkalta.

Taulukossa 5.1 on esitetty vapautettu kokonaisjännennoima ja vastaava uudelleenankkuroitumispituus jokaisella vapautuksella. Uudelleenankkuroitumispituudet on määritetty kohdassa 4.4.1 esitetyn menetelmän mukaisista puristumakäyrien soviteista.



**Taulukko 5.1** Palkkien uudelleenankkuroituminen. <sup>1)</sup> Jännepunokset eivät vapautuneet täysin. <sup>2)</sup> Injektionnin onnistuminen epävarma. <sup>3)</sup> Osa punoksista vapautettiin ennen mittausta. <sup>4)</sup> Approksimaatiokäyrän muodostaminen ei onnistunut hyvin, pituudet arvioitu silmämääräisesti puristumakuvaajista. Hylättyjen koepalkkien tulokset yliviivattuna.

	Vapautus 1		Vapautus 2		Vapautus 3	
	Pituus [m]	Voima [kN]	Pituus [m]	Voima [kN]	Pituus [m]	Voima [kN]
Palkki 2 <sup>2)</sup>	0,99	219 <sup>1)</sup>	1,37	402 <sup>1)</sup>	1,59	4580
Palkki 3	0,69	240 <sup>1)</sup>	0,84	591 <sup>1)</sup>	1,37	4563
Palkki 1	0,92	574	1,07	1168 <sup>1)</sup>	1,25	1845
Palkki 4	1,12	564	1,27	1119	1,43	1982
Palkki 5	1,99	595	2,06	1196	2,18	1792
Palkki 6 <sup>2)</sup>	2,29	567	2,54	1159	2,49	1724
Palkki 7	1,53	583	1,66	1152	1,90	1754
Palkki 8	1,74	575	2,06	1211	2,14	1874
Palkki 9	0,85	602	1,05	1234	1,16 <sup>4)</sup>	1847
Palkki 10	0,97	612	1,10	1186	1,23 <sup>4)</sup>	1797
Palkki 11	0,66	280 <sup>3)</sup>	0,85	845	1,14	1489
Palkki 12 <sup>4)</sup>	0,98	561	1,08	1134	1,23	1712
Palkki 13	2,16	313 <sup>3)</sup>	2,33	922	1,71	1529
Palkki 14	1,40	594	Läpi	1204	Läpi	1824
Palkki 15	Läpi	612	Läpi	1232	Läpi	1867
Palkki 16	Läpi	596	Läpi	1225	Läpi	1834

Kokeista 2 ja 3 saadaan vastaavan suuruiset uudelleenankkuroitumispituuden tulokset palkkeihin 1 ja 4 verrattuna pienemmällä jännevoimalla. Tämä saattaa selittyä punosten erilaisesta jännittämisohjelmasta. Osa palkkien 2 ja 3 punoksista ankkuroitiin pienempään jännitykseen, kun taas loput tavoiteltuun 1000 MPa jännitykseen, jolloin uudelleenankkuroitumispituus näkyy tuloksissa niiden mukaan.

Palkin 2 tulos jätetään huomiotta, koska injektioinnin onnistumisesta on epävarmuutta. Palkin 3 tulos ei yksinään ole vertailukelpoinen kappaleessa 4.4.3 esitetyistä ongelmista johtuen, joten se jätetään huomiotta. Kun palkkien 1 ja 4 uudelleenankkuroitumispituus suhteutetaan punosten jännitystasoon, saadaan keskimääräiseksi uudelleenankkuroitumispituudeksi jännityksen ollessa 1000 MPa:

- 4 punoksella 1077 mm
- 8 punoksella 1231 mm
- 12 punoksella 1259 mm

Palkin 6 tulos jätetään huomiotta, koska injektoinnin onnistumisesta on epävarmuutta. Lisäksi sirppipalan irtoaminen vääristää tilannetta. Kun palkkien 5, 7 ja 8 uudelleenankkuroitumispituus suhteutetaan punosten jännitystasoon, saadaan keskimääräiseksi uudelleenankkuroitumispiteudeksi jännityksen ollessa 1000 MPa:

- 4 punoksella 1796 mm
- 8 punoksella 1946 mm
- 12 punoksella 2065 mm

Kun arvoja verrataan täysin injektoituun tapaukseen, on uudelleenankkuroitumispiteus kasvanut noin 65 %. Injektoinnin onnistumisella on siis selvä vaikutus uudelleenankkuroitumispiteuteen ilmataskujen osalta, vaikka jänneteräukset olisivatkin kauttaaltaan injektointimassan ympäröimiä. Tämä voitaisiin selittää Hoyer-efektin aiheuttamalla punosten laajenemisella, mikä saisi sementtipinnan ”korkkaamaan” tyhjätilaan jolloin tartuntapiiri pienenisi.

Palkin 11 ensimmäiset 2 jännepunosta vapautettiin vahingossa ennen mittauksen aloittamista. Tämä vääristi tuloksia, joten palkki 11 jätettiin huomiotta. Kun palkkien 9, 10 ja 12 uudelleenankkuroitumispiteus suhteutetaan punosten jännitystasoon, saadaan keskimääräiseksi uudelleenankkuroitumispiteudeksi jännityksen ollessa 1000 MPa:

- 4 punoksella 949 mm
- 8 punoksella 1092 mm
- 12 punoksella 1219 mm

Palkkien keskimääräiset jännevoiman uudelleenankkuroitumispiteudet suhteutettuna 1000 MPa punosjännitystä kohden on esitetty kootusti taulukossa 5.2.

**Taulukko 5.2** Keskimääräiset uudelleenankkuroitumispiteudet eri tilanteissa suhteutettuna 1000 MPa punosjännitystä kohden.

Vapautettu	4 Punosta	8 Punosta	12 Punosta
	Pituus [m]	Pituus [m]	Pituus [m]
Täysi injektointi, pitkä palkki	1,08	1,23	1,26
Täysi injektointi, lyhyt palkki	0,95	1,09	1,22
Vajaa injektointi, pitkä palkki	1,80	1,95	2,07

Taulukossa 5.3 on esitetty aktiivipään voima palkkikokeiden lisäjännitysten aikana. Muutoksesta voidaan havaita tartunnan menetys kokeen aikana. Voiman arvon putoaminen viittaisi tartunnan menetykseen koko palkin matkalta, jolloin passiivipäästä vapautettu jännevoima ei siirry rakenteeseen ja myös aktiivipään voima putoaisi vastaavan määrän.

Voiman arvo voi teoreettisesti pudota noin 33 % alkuvoimasta jokaista vapautusta seurannutta lisäjännitystä kohden.

**Taulukko 5.3** Aktiivipään voiman arvo palkkikokeiden lisäjännitysten aikana.  
<sup>3)</sup>Osa punoksista vapautettiin ennen mittausta

Palkki	1. lisäjännitys [kN]			2. lisäjännitys [kN]			3. lisäjännitys [kN]			Lisäjännitys maksimivoimaan [kN]			
	Ennen	Jälkeen	Muutos	Ennen	Jälkeen	Muutos	Ennen	Jälkeen	Muutos	Ennen	Max	Jälkeen	Muutos
1	1678	1653	-1 %	1652	1643	-1 %	1646	1649	0 %	1650	2507	1576	-4 %
2	1493	1465	-2 %	1457	1439	-2 %				1436	2622	1681	16 %
3	1503	1485	-1 %				1473	1483	0 %	1483	2742	1784	20 %
4	1707	1682	-1 %	1666	1653	-2 %	1656	1659	0 %	1659	2548	1630	-2 %
9	1729	1759	2 %	1757	1725	-2 %	1711	1471	-15 %	1471	2238	113	-79 %
10	1779	1764	-1 %	1769	1741	-1 %	1725	1449	-16 %	1449	2245	202	-70 %
11 <sup>3)</sup>	1727	1713	-1 %	1739	1713	0 %	1699	1654	-3 %	1654	2481	91	-91 %
12	1727	1709	-1 %	1707	1701	0 %	1699	1662	-2 %	1661	2475	413	-72 %
Palkki	1. lisäjännitys [kN]			2. lisäjännitys [kN]			3. lisäjännitys [kN]			Lisäjännitys maksimivoimaan [kN]			
	Ennen	Jälkeen	Muutos	Ennen	Jälkeen	Muutos	Ennen	Jälkeen	Muutos	Ennen	Max	Jälkeen	Muutos
5	1810	1778	-2 %	1780	1758	-1 %	1751	1748	-1 %	1747	2711	1780	2 %
6	1818	1793	-1 %	1789	1782	-1 %	1778	1711	-4 %	1712	2416	1254	-25 %
7	1797	1774	-1 %	1772	1766	0 %	1751	1750	-1 %	1748	2689	1898	8 %
8	1754	1728	-1 %	1723	1719	-1 %	1711	1719	0 %	1715	2547	1640	-5 %
13 <sup>3)</sup>	1579	1202	-24 %	1199	1233	2 %	1184	27	-76 %				
14	1776	1242	-30 %	1239	1232	-1 %	1237	1203	-2 %	1205	1962	122	-61 %
15	1911	1440	-25 %	1444	248	-62 %	242	178	-4 %				
16	1804	1251	-31 %	1248	1073	-10 %	1029	947	-7 %	948	1360	82	-48 %

Tuloksista huomataan voiman säilyneen hyvin kaikilla lisäjännityksillä täyden injektoinnin pitkällä koepalkeilla 1-4. Täyden injektoinnin lyhyillä koepalkeilla 9-12 voima kuitenkin putosi merkittävästi maksimivoimaan lisäjännitettäessä. Tämä tarkoittaa sitä, että lisäjännityksen tartuntapituus ja vapautetun jännevoiman uudelleenankkuroitumispituu- det ristesivät ja tartunta petti. Vajaan injektoinnin pitkällä koepalkeilla 5-8 aktiivipään voima säilyi hyvin lisäjännityksistä huolimatta. Vajaan injektoinnin lyhyillä koepalkeilla 13-16 puolestaan voima putosi heti ensimmäisellä lisäjännityksellä, koepalkin 13 tapauk- sessa jo ensimmäisen vapautuksen yhteydessä.

Tuloksista voidaan päätellä, että kun lisäjännityksen tartuntapituus ulottuu vapautuneen jännevoiman uudelleenankkuroitumispitouden alueelle, tartunta menetetään, ainakin jos- sain määrin. Mikäli tartuntapituus ei ulotu uudelleenankkuroitumispitouden alueelle, tar- tunta ei häiriinny. Taulukossa 5.4 on esitetty lisäjännityksen tartuntapituus koepalkeilla 1 ja 4, sekä tartuntapituus suhteutettuna 500 MPa suuruista jännityslisää kohden.

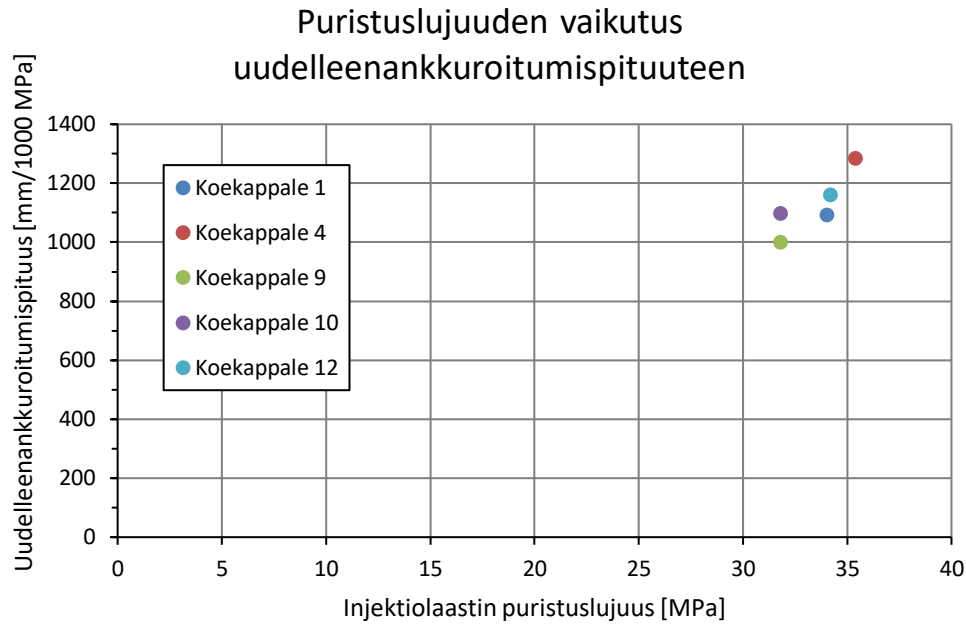
**Taulukko 5.4**      *Lisäjännityksen tartuntapituus täydellä injektoinnilla.*

	Tartuntapituus [m]	Lisävoima [kN]	Tartuntapituus [m] /500 MPa
Palkki 1	0,92	834	0,99
Palkki 4	0,94	841	1,01

Taulukossa 5.5 on esitetty täyden injektoinnin koekappaleiden injektointilaastin puristus- ja taivutusvetolujuudet. Kuvaajassa 5.3 puolestaan on esitetty täyden injektoinnin koekappaleiden uudelleenankkuroitumispituus injektointilaastin puristuslujuuden suhteen. Puristuslujuuden arvot ovat lähellä toisiaan, joten päätelmien tekeminen laastilujuuden vaikutuksesta uudelleenankkuroitumispiteuteen ei voi tulosten perusteella tehdä. Taivutusvetolujuuden tuloksissa oli suuri hajonta ja tulokset eivät korreloineet puristuslujuuden kanssa.

**Taulukko 5.5**      *Palkkien 1-4 sekä 9-12 injektioalaastin puristus- ja taivutusvetolujuudet. Huomiotta jätettyjen koepalkkien lujuuden yliviivattuna.*

	Puristuslujuus [MPa]	Taivutusvetolujuus [MPa]
<del>Palkki 2</del>	40,2	<del>4,95</del>
<del>Palkki 3</del>	<del>35,8</del>	<del>2,04</del>
Palkki 1	34,0	3,01
Palkki 4	35,4	2,60
Palkki 9	31,8	6,30
Palkki 10	31,8	6,30
<del>Palkki 11</del>	<del>34,2</del>	<del>5,03</del>
Palkki 12	34,2	5,03



**Kuvaaja 5.3** Injektointilaastin puristuslujuuden vaikutus uudelleenankkuroitumispiteuteen täydellä injektioinnilla.

Pienestä koemäärästä huolimatta saatiin kokeiden perusteella määriteltyä jännepunoksille arvio uudelleenankkuroitumispiteudesta. Onnistuneella, koko suojaputken täyttävällä injektioinnilla jännepunosten uudelleenankkuroitumispiteus oli 1130-1300 mm 1000 MPa:n jännitystä kohden. Pituus kasvoi mitä enemmän punoksia vapautettiin. Kasvu oli 4 ja 12 punoksen välillä noin 20 %. Tämä viittaa punosten ”tukeutuvan” jonkin verran toisiinsa.

Vajaan injektioinnin koekappaleista huomattiin injektioinnin onnistumisen merkitys uudelleenankkuroitumispiteuteen. 20 mm korkuinen tyhjätila suojaputkessa pidensi uudelleenankkuroitumispiteutta noin 65 % täydelliseen injektointiin verrattuna. Palkkien 13-16 kokeiden perusteella (päälimmäisten punosten ankkuroinnin menetys) vaikutus oli suurin päälimmäisiin punoksiin, jotka sijaitsevat lähimpänä tyhjätilaa. Mahdollisesti punosten vapautuessa Hoyer-efektin aiheuttama puristusaine halkaisi injektioilasta tyhjätilaan. Myös vajaalla injektioinnilla havaittiin uudelleenankkuroitumispiteuden kasvua, kun jännepunoksia vapautettiin lisää.

Kolmesta palkista ja yksittäisestä injektointilaitteen testauksen yhteydessä tehdystä koekappaleesta (pelkkä suojaputki, jossa jänneteräukset lepäsivät) katkaistuista poikkileikkaussiiuista huomattiin onnistuneen injektioinnin hyvä kattavuus (esimerkkinä Kuva 5.1). Injektointimassa tunkeutui tehokkaasti punosten väleihin ja jopa yksittäisten lankojen väliin. Tämän perusteella onnistunut injektointi tarjoaa hyvät ankkuroitumisolosuhteet jännepunoksille, mikä tarkoittaisi jännepunosten hyvää, itsenäistä ankkuroitumiskäyttäytymistä. Tällöin uudelleenankkuroitumispiteuden ei olettaisi kasvavan lisää punoksia vapauttaessa. Kuitenkin, jos vierekkäiset punokset vapautuvat punosten läheisyys

saattaa heikentää niiden välisen injektointimassan toimintaa, mikä aiheuttaisi uudelleenankkuroitumispituuden kasvua. Koetulokset vaikuttaisivat tukevan tätä ajattelua, uudelleenankkurointipituus kasvaa, kun lisää punoksia vapautetaan, mutta vaikutus on suhteellisen pieni.



**Kuva 5.1** Koepalkista sahattu poikkileikkaus, josta nähdään onnistuneen injektoinnin hyvä kattavuus.

## 5.2 Tartunnan mallintaminen

Määritetään kappaleessa 3.4 esitetyillä kaavoilla 3.1 ja 3.2 jännepunosten ankkurointipituus numeerisella prosessilla. Tartuntajännitys määritetään 0,1 mm välein, ja jokaisen välin tartuntalujuuden perusteella määritetään ankkuroitunut jännevoima seuraavaan väliin mennessä. Prosessi kulkee täysin ankkuroituneesta poikkileikkauksesta (täysi jännevoima), poikkileikkaukseen jossa punos on katkennut (jännevoima nolla).

x	Jännevoima F [kN]	Venymä $\varepsilon$ [ ]	Liukuma $\delta$ [mm]	Jännitysmuutos $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Tartuntajännitys $\tau$ [N/mm]
0,0	1800	0,0053	0,00	0,0	0,0
0,1	1800	0,0053	0,00	0,0	0,9
0,2	1800	0,0053	0,00	0,0	4,8
0,3	1800	0,0053	0,00	0,0	8,0
0,4	1800	0,0053	0,00	0,0	10,6
0,5	1800	0,0053	0,00	0,0	12,9
0,6	1800	0,0053	0,00	0,0	15,0

**Kuva 5.2** Uudelleenankkuroitumispituuden laskentaprosessi Excel-taulukkolaskentaohjelmassa (katso kaavat 5.1-5.4). Prosessi kulkee täysin ankkuroituneesta poikkileikkauksesta, poikkileikkaukseen jossa punos on katkennut.

$$\varepsilon_i = \frac{F_i}{A_{sp.tot}E} \quad (5.1)$$

$$\delta_i = \delta_{i-1} + (\varepsilon_0 - \varepsilon_i)0,1mm \quad (5.2)$$

$$\Delta\sigma_i = \frac{F_i - F_0}{A_{sp}} \quad (5.3)$$

, joissa  $F_i$  on jännevoima poikkileikkauksessa  $i$ ,  
 $\varepsilon_i$  on jännepunosten venymä poikkileikkauksessa  $i$ ,  
 $A_{sp,tot}$  on jännepunosten poikkipinta-ala,  
 $E$  on jännepunosten kimmokerroin,  
 $\delta_i$  on punosrajapinnan liukuma poikkileikkauksessa  $i$  ja  
 $\Delta\sigma_i$  on jännepunosten jännitysmuutos poikkileikkauksessa  $i$ .

Tartuntajännitys  $\tau_n$  määritetään kohdassa 3.4 esitetyillä kaavoilla, joko liukuman, punoksen jännitysmuutoksen suhteen, tai molempien suhteen. Seuraavan rivin jännevoima määritetään seuraavalla kaavalla.

$$F_{i+1} = F_i - \tau_i p_{tot} * 0,1mm \quad (5.4)$$

, missä  $\tau_i$  on tartuntajännitys poikkileikkauksessa  $i$  ja  
 $p_{tot}$  on jännepunosnipun tartuntapiiri.

Jännepunosnipun tartuntapiiri on vaikea määrittää tarkasti. Yksittäisen jännepunoksen tartuntapiiriksi voitaneen olettaa kehä, joka on suorassa kontaktissa ympäröivän sementin kanssa, eli yksittäisten lankojen välinen tila jätetään huomioimatta (kuva 5.3). Tätä varten on selvitettävä yksittäisen langan halkaisija:

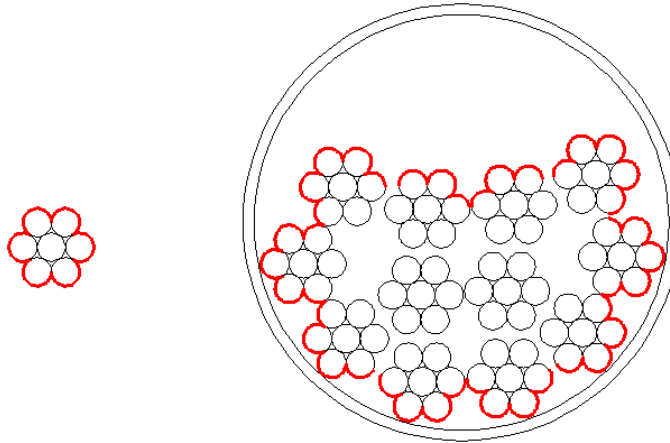
$$d_{lanka} = 2 * \sqrt{\frac{A_{sp}}{7\pi}} \quad (5.5)$$

$$p = 6 * \frac{240}{360} \pi * d_{lanka} \quad (5.6)$$

, missä  $A_{sp}$  on jännepunoksen poikkipinta-ala,  
 $d_{lanka}$  on yksittäisen langan halkaisija ja  
 $p$  on jännepunoksen tartuntapiiri.

Jännepunosnipun tartuntapiiriä määritettäessä ajatellaan vain uloimpien 10 jännepunoksen siirtävän voimaa ympäröivään rakenteeseen tartunnan kautta kukin noin puolella piirillään (kuva 5.3). Täten jännepunosnipun kokonaistartuntapiiri  $p_{tot}$  saadaan arvioitua kaavalla:

$$p_{tot} = 10 * 0,5 * p \quad (5.7)$$



**Kuva 5.3** Tartuntapiirin (punaisella) määrittäminen yksittäisessä punoksessa (vasen) ja jännepunosnipussa (oikea).

**Taulukko 5.6** Laskennassa käytetyt lähtö- ja väliarvot.

Suure	Merkintä	Arvo
Jänneteräksen kimmokerroin	E	195 GPa
Jännevoiman alkuarvo yksittäisessä jännepunoksessa	$F_0$	150 kN
Yksittäisen jännepunoksen poikkipinta-ala	$A_{sp}$	150 mm <sup>2</sup>
Yksittäisen langan halkaisija	$d_{lanka}$	5,2 mm
Jännepunoksen tartuntapiiri	p	65,6 mm
Jännepunosnipun tartuntapiiri	$p_{tot}$	328,0 mm

Sovelletaan aiemmin esitettyä iteratiivista laskentaprosessia kappaleen 3.4 kaavoja 3.1 ja 3.2. Tarkemman tiedon puutteessa käytetään samoja kertoimia kuin lähteen [2] mukaan 12,8 mm jännepunokselle. Ympäröivän sementin puristuslujuudeksi määritettiin 35 MPa. Kaavan 5.8 tapauksessa tartuntajännitykselle joudutaan antamaan erittäin pieni alkuarvo (0,00001 N/mm), jotta iteratiivinen prosessi lähtee käyntiin. Alkuarvon suuruuden vaikutus määritettyyn uudelleenankkuroitumispiituuteen on häviävän pieni.

$$\tau_{b,i} = \eta_1 \eta_2 f_{ci}^{0,5} \left( \frac{\delta_i}{\theta_p} \right)^{\eta_3} \quad [\text{MPa}] \quad (5.8)$$

, missä

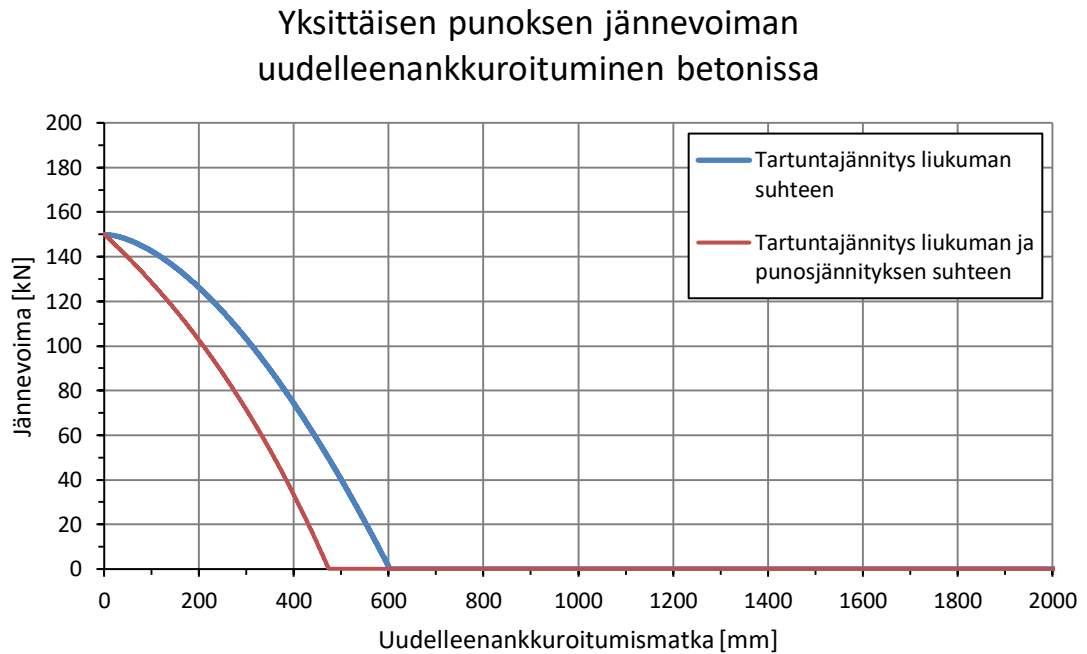
$\tau_{b,i}$	on tartuntajännitys liukuman suhteen,
$\delta_i$	on punosten liukuma,
$\theta_p = 15,7 \text{ mm}$	on punoksen nimellishalkaisija,
$f_{ci} = 35 \text{ MPa}$	on betonin puristuslujuus,
$\eta_1 = 1,0$	kun keskimääräinen tartuntapituus,
$\eta_2 = 2,055$	kun jännepunoksen nimellishalkaisija 12,8 mm ja
$\eta_3 = 0,25$	kun jännepunoksen nimellishalkaisija 12,8 mm.

$$\tau_{b,i} = 3 + 0,4\delta_i - 2,5 * 10^{-3} \Delta\sigma_{p,i} + 1,5 * 10^{-3} |\Delta\sigma_{p,i}| \quad [\text{MPa}] \quad (5.9)$$

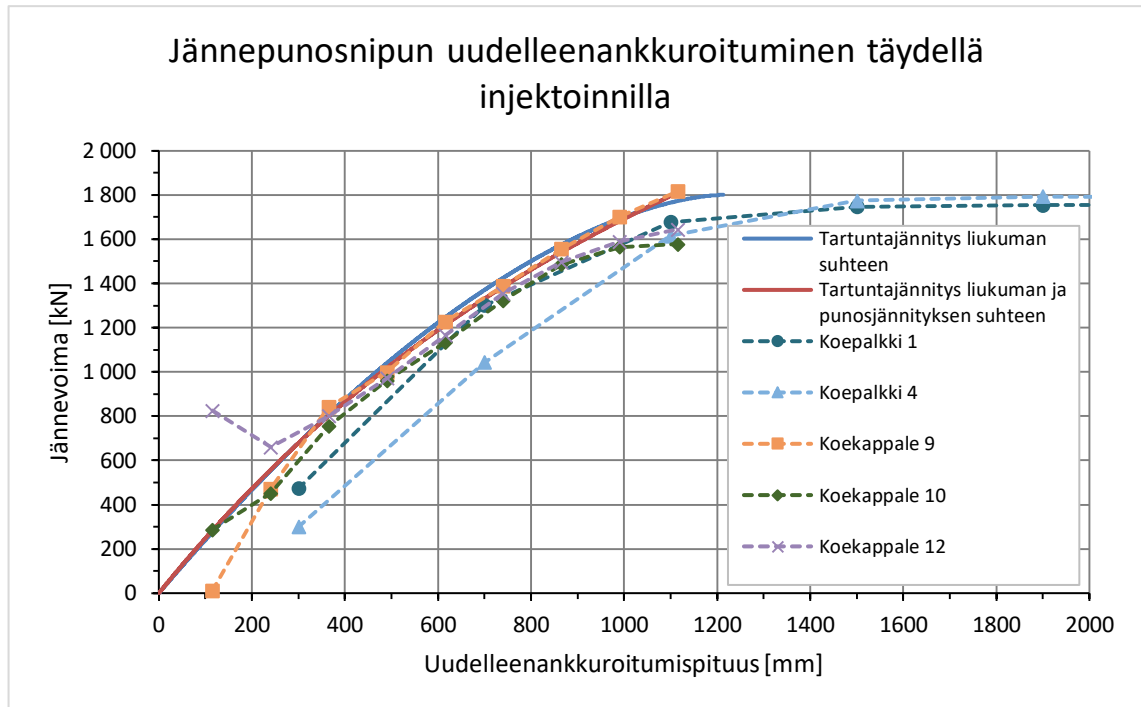


, missä  $\tau_{b,i}$  on tartuntajännitys liukuman ja punosjännityksen suhteen,  
 $\delta_i$  on punosten liukuma ja  
 $\Delta\sigma_{p,i}$  on punosjännityksen muutos.

Tartuntajännityksen perusteella määritetään kaavojen 5.1 – 5.9 avulla jännevoiman käyrät uudelleenankkuroitumispituuden matkalla:



**Kuvaaja 5.4** Yksittäisen punoksen jännevoiman kehittyminen uudelleenankkuroitumispituuden matkalla, kun tartuntajännitystä mallinnetaan liukuman suhteen (kaava 5.8) tai liukuman sekä punosjännityksen suhteen (kaava 5.9).



**Kuvaaja 5.5** Jännepunosnipun jännevoiman kehittyminen uudelleenankkuroitumis pituuden matkalla, kun tartuntajännitystä mallinnetaan liukuman suhteen (kaava 5.8), liukuman ja punosjännityksen suhteen (kaava 5.9) jännepunosnipussa sekä koetulosten perusteella.

Kun tartuntajännitys määritetään liukuman suhteen, saadaan jännepunosnipun uudelleenankkuroitumis pituudeksi 1214 mm. Kun tartuntajännitys määritetään sekä liukuman, että punosjännityksen suhteen, saadaan uudelleenankkuroitumis pituudeksi 1105 mm. Huomioitavaa on, että käytetyt kaavat on kalibroitu yksittäisen jännepunosnipun tartunnalle betonissa. Lisäksi tartuntapiiri on arvioitu punosnipun geometrian perusteella, todellinen tartuntapiiri saattaa poiketa tästä.

Määritetään uudelleenankkuroitumis pituus seuraavaksi soveltamalla kappaleessa 3.4 esitettyjä kaavoja 3.3–3.7 [7]. Taulukkoon 5.7 on koottu laskennassa käytetyt lähtöarvot ja kertoimet. Materiaalien osavarmuuskertoimina käytettiin arvoa 1,0.

**Taulukko 5.7** Uudelleenankkurointipituuden laskennallisessa määrittämisessä käytetyt lähtöarvot ja kertoimet

Suure	Merkintä	Arvo
Injektointisementin vetolujuus	$f_{ctd}$	3,2 MPa
Jännepunosnipin myötölujuus	$f_{ptd}$	1860 MPa
Yksittäisen punoksen poikkipinta-ala	$A_{sp}$	150 mm <sup>2</sup>
Yksittäisen punoksen nimellishalkaisija	$\phi$	15,7 mm
Uudelleenankkuroituva punosjännitys	$\sigma_{pi}$	1000 MPa
Punostyyppin kerroin	$\eta_{p1}$	1,2
Punosnipin sijainnin kerroin	$\eta_{p2}$	1,0
Vapautuksen kerroin	$\alpha_{p1}$	1,25
Reaktivoimien kerroin	$\alpha_{p2}$	1,0
Tartuntatyyppin kerroin	$\alpha_{p3}$	0,5

Tällöin yksittäisen punoksen uudelleenankkuroitumispituudelle saadaan:

$$f_{bpd} = \eta_{p1}\eta_{p2}f_{ctd} = 3,84 \text{ MPa} \quad (5.10)$$

$$l_{bp} = \frac{A_{sp} f_{ptd}}{\phi \pi f_{bpd}} = 1473 \text{ mm} \quad (5.11)$$

$$l_{bpt} = \alpha_{p1}\alpha_{p2}\alpha_{p3} \frac{\sigma_{pi}}{f_{bpd}} l_{bp} = 495 \text{ mm} \quad (5.12)$$

Laskentaa voidaan soveltaa jännepunosnippun uudelleenankkuroitumiselle määrittämällä Eurokoodissa [6, kaava 6.64] esitetty jännepunosnippun ekvivalentti halkaisija:

$$\phi_{eq} = 1,6\sqrt{12 * A_{sp}} = 67,9 \text{ mm} \quad (5.13)$$

Tällöin:

$$l_{bp} = \frac{A_{sp} f_{ptd}}{\phi_{eq} \pi f_{bpd}} = 4088 \text{ mm} \quad (5.14)$$

$$l_{bpt} = \alpha_{p1}\alpha_{p2}\alpha_{p3} \frac{\sigma_{pi}}{f_{bpd}} l_{bp} = 1374 \text{ mm} \quad (5.15)$$

Tartuntapituuden perusarvon kaavaa voidaan soveltaa tartuntapituuden määrittämiseen lisäjännitykselle. Perusarvo kertoo tartuntapituuden jännepunoksen täydelle jännitykselle. Tällöin kun jännepunoksen vetolujuuden arvo korvataan lisäjännityksen suuruudella ( $\Delta\sigma_{pi} = 500 \text{ MPa}$ ) voidaan ajatella kaavan antavan tulokseksi tartuntapituus lisäjännitykselle:

$$l_{bp,\Delta\sigma} = \frac{A_{sp} \Delta\sigma_{pi}}{\phi_{eq} \pi f_{bpd}} = 1099 \text{ mm} \quad (5.16)$$

### 5.3 Koetulosten vertaaminen laskennallisiin malleihin

Kun uudelleenankkuroitumispituuden laskennallisesti määritettyjä arvoja verrataan kuormituskokeista saatuihin tuloksiin, huomataan niiden vastaavan toisiaan hyvin. Jännevoiman laskennallinen kehittyminen uudelleenankkuroitumispituuden matkalla mukaillee kuormituskokeiden puristuman-arvoista muodostettuja käyriä (Kuvaaja 5.9). Yksinkertaisempi uudelleenankkuroitumispituuden määrittäminen (Kaavat 5.10-5.15) antaa tulokseksi edellisen kappaleen oletuksilla 1374 mm. Kuormituskokeiden perusteella määritetty vastaava arvo on noin 1240 mm, jolloin ero on noin 12 % kuormituskokeisiin verrattuna.

Kaavat perustuvat kokeelliseen dataan ja niissä käytetyt kertoimet on kalibroitu yhden halkaisijaltaan 12,8 mm olevan jännepunoksen ankkuroitumiselle betonissa. Uusien, jännepunosnippulle soveltuvien kertoimien määrittäminen vaatisi huomattavan määrän koe-kuormituksia, eikä niitä tämän työn tulosten pohjalta voi siten muodostaa.

Koekappaleiden 1 ja 4 tulosten keskiarvona saatu lisäjännityksen tartuntapituus oli 1000 mm suhteutettuna 500 MPa:n lisäjännitystä kohti. Tällöin laskennallisen arvon ero verrattuna kokeiden perusteella määritettyyn on noin 10 %. Näiden tulosten perusteella vaikuttaisi siltä, että kirjallisuudessa esitetyt kaavat soveltuvat kohtuullisen hyvin uudelleenankkuroitumisen ja tartunnan arvioimiseen myös koejärjestelyn mukaisessa tilanteessa, jossa esijännitetty punosnippu ankkuroituu injektointisementtiin. Vertailukelpoisten tulosten määrä on kuitenkin erittäin rajallinen, joten yleistystä tulosten pohjalta ei pystytä johtamaan. Jatkotutkimuksissa tarkasteltavia asioita olisivat jännepunosten käyttäytyminen eri tilanteissa, kuten eri punosmäärillä ja -jännityksillä, sekä koko rakenteen käyttäytyminen jännepunoksen/-punosten vauriotilanteessa.

## 5.4 Virhearviointi

Kuormituskokeiden mahdolliset virhelähteet voidaan jakaa 4 kategoriaan: mittaus- ja analysointitekniisiin virheisiin, ympäristötekijöistä aiheutuviin virheisiin, koekappaleiden virheisiin sekä inhimillisiin virhelähteisiin.

Mittauksissa käytetyillä venymäantureilla on oma virhetoleranssinsa. Valmistaja ilmoittaa anturin kertoimen (kerroin signaalin muuttamiseksi venymän arvoksi) virherajaksi  $\pm 1$  %. Tämän lisäksi anturin resistanssin virheeksi ilmoitetaan noin  $\pm 1$  %. Tämä koskee sekä betonin puristumaa mittaavia venymäanturoita, että jännitysjakkaroiden voima-antureina käytettyjä 4 kappaletta venymäantureita. Mittaustarkkuuden virhe on kuitenkin todennäköisesti pieni verrattuna muihin virhelähteisiin.

Uudelleenankkuroitumispituus määritettiin puristumakäyrien soviteista. Määrittämisessä tehtiin useita oletuksia, joiden oikeellisuudesta ei ole varmuutta. Täten uudelleenankkuroitumispituuden määrittämismenetelmä on mahdollinen virhelähde. Tulokset kuitenkin vaikuttivat silmämääräisesti oikeilta ja menetelmän avulla pystyttiin poistamaan inhimillisen virheen vaikutus uudelleenankkuroitumispituuden määrittämisestä.

Koekappaleet itsessään saattoivat aiheuttaa virhettä koetuloksiin. Betonin epähomogeenisyys aiheuttaa eroja venymäliuskojen käyttäytymiselle. Tämä ei suoranaisesti aiheuta virhettä tulokseen puristuman arvojen suhteutuksen vuoksi, mutta vaikeuttaa tulosten tulkintaa. Lisäksi materiaalista tehtiin tiettyjä oletuksia, kuten tasainen jännitysjakautuma tiettyssä ajanvaiheessa. Nämä oletukset eivät välttämättä pitäneet enää paikkaansa vapautuskokeita suoritettaessa. Huomattavin virhelähde koekappaleiden kannalta kuitenkin on in-

jektoinnin epäonnistuminen. Koekappaleet joiden injektoinnin onnistumisesta oli epävarmuutta, jätettiin tuloksia käsiteltäessä huomiotta. Injektoinnin onnistumisesta oli kuitenkin mahdoton täysin varmistua, joten se on mahdollinen virhelähde.

Koekappaleet olivat hallissa suojaamattomina, joten ne olivat alttiina lämpötilavaihteille, sekä auringonvalolle. On mahdollista, että erityisesti suora auringonvalo vaikutti venymäliuskojen tulokseen esimerkiksi koekappaleen tai jännitysjakkaran lämpenemisen seurauksena. Injektointisementin kovettuessa joistakin koekappaleista mitattiin betonin virumaa. Mittauksesta huomattiin venymäliuskojen datassa häiriötä aina, kun koehallin valot olivat päällä. Häiriö aiheutti signaaliin lievää kohinaa. Lisäksi ensimmäisten koekappaleiden ankkuroinnin aikana huomattiin liitinten heilahtelun vaikuttavan erittäin merkittävästi mittalaitteiden signaaliin. Liittimet kuitenkin vaihdettiin tukevampiin ja johtoliitokset juotettiin kiinni. Tämän jälkeen liittimistä aiheutuneita ongelmia ei enää havaittu.

Inhimilliset tekijät ovat aina läsnä kokeellista tutkimusta tehtäessä. Näiden kokeiden tapauksessa mahdollisia inhimillisiä virhelähteitä ovat työvirheet kokeita valmistellessa ja suoritettaessa, dataa käsiteltäessä tai tuloksia tulkittaessa. Tällaisia ovat muun muassa väärin asetusten asettaminen mittauslaitteistoon, laskuvirheet tai virheet tuloksia kopioidessa laskentaohjelmasta toiseen.

## 5.5 Jatkotutkimus

Tutkimuksessa päästiin asetettuun tavoitteeseen, tulosten pohjalta saatiin vahvistusta laskentamallien soveltuvuudelle jännevoiman uudelleenankkuroitumisen tarkasteluun jännepunosten vaurioilanteessa, kokemusta jännepunosten käyttäytymisestä onnistuneessa ja vajaassa injektoinnissa, havaintoja lisäjännityksen vaikutuksesta uudelleenankkuroitumiseen vaurioalueella, sekä koejärjestelyn toimivuudesta ja kokeiden suorittamisesta. Tuloksia voidaan hyödyntää laajemmassa tutkimuksessa siltojen jännepunosvaurioista.

Jatkotutkimuksissa tulisi tutkia laskentamallien soveltuvuutta muissa kuin tämän tutkimuksen mukaisissa koetilanteissa. Mielenkiintoisia muuttujia voisivat olla jännepunosten määrä, uudelleenankkuroituva punosjännitys, punosten liukuma ja injektointilaastin lujuus. Lisäksi koemäärää tulisi kasvattaa ja erillisiä kokeita yhdenmukaistaa vertailukelpoisuuden saavuttamiseksi. Koetulosten tarkastelussa ongelmaksi muodostui useamman ilmiön testaaminen samalla koejärjestelyllä, sekä kokeen muuttaminen lennosta, jolloin tulosten pohjalta päätelmien tekeminen vaikeutui tai muodostui mahdottomaksi. Mahdollisissa jatkotutkimuksissa tulisi keskittyä erikseen uudelleenankkuroitumiseen ja lisäjännityksen tartuntaan.

Laajemmassa kontekstissa jatkotutkimustarpeena olisi jännitetyn rakenteen toiminta kokonaisuutena jännepunosten vaurioilanteessa. Tarkasteltavia asioita voisivat olla muun

muassa vaurion merkitys rakenteen toiminnalle, rakenteen vaurioherkkyys, sekä vaurion havaitseminen esimerkiksi halkeamien muodostumisena.

## 6. YHTEENVETO

Diplomityön tarkoituksena oli tutkia jälkijännitetyn, tartunnallisen rakenteen toimintaa jännepunosten vauriotilanteessa. Tavoitteena oli selvittää jännepunosnipun jännevoiman uudelleenankkuroitumispituus punoksen tai punosten katketessa jossakin rakenteen poikileikkauksessa, jotta tuloksia voidaan verrata kirjallisuudessa esitettyihin laskentamalleihin ja siten saada lisätietoa jatkotutkimuksia varten. Lisäksi pyrittiin selvittämään jännepunosnipun käyttäytyminen, kun vaurioalueelle kohdistuu lisäpunosjännitystä. Käyttäytymistä tutkittiin sekä täydellä, että vajaalla injektoinnilla.

Koekappaleina toimi 16 kappaletta 400x400 mm<sup>2</sup> vaihtelevan pituista betonipalkkia, joiden sisällä kulkevaan suojaputkeen jännitettiin ja injektointiin 12 kappaletta jännepunosia nipussa noin 1000 MPa punosjännitykseen. Injektointin kovetuttua jännepunosten katkeamista simuloitiin vapauttamalla punoksia passiivipäästä. Lisäjännitystä punoksiin vedettiin aktiivipäästä vapautusten välissä ja kokeen lopuksi. Punosten uudelleenankkuroitumista ja lisäjännityksen tartuntaa seurattiin betonipalkin pintaan asennettujen venymäanturien avulla.

Kuormituskokeissa oli haasteita ja vertailuun soveltuvien koetulosten määrä jäi odotettua pienemmäksi. Kuitenkin tulosten perusteella raportissa esitetyt laskennalliset mallit vaikuttavat soveltuvan jännepunosnipun uudelleenankkuroitumisen tarkasteluun. Seuraavassa taulukossa on esitetty jännepunosnipun keskimääräinen uudelleenankkuroitumispi- tuus koekappaleiden 1, 4, 9, 10 ja 12 koetulosten perusteella, sekä vastaavat laskennalliset arvot:

**Taulukko 6.1** Kuormituskokeiden perusteella määritetty jännepunosnipun uudelleenankkuroitumispi- tuus verrattuna kirjallisuuden laskentamalleilla saatuihin arvoihin.

Suure	Uudelleenankkuroitumispi- tuus [mm/1000 MPa]	Ero [%]
Koetulosten perusteella	1239	-
Tartunta liukuman perusteella	1214	-2,0
Tartunta liukuman ja punosjän- nityksen muutoksen perusteella	1105	-10,8
Malli- ja eurokoodin laskentakaa- vat	1374	10,9

Tulosten perusteella esitettyjä tartuntamalleja ja laskentamenetelmiä voitaneen käyttää jatkotutkimuksissa koejärjestelyn asettamissa raameissa mallintamaan vaurioituneiden jännepunosten uudelleenankkuroitumista rakenteessa. Tulosten perusteella ei kuitenkaan voida tehdä yleistystä mallien toimivuudesta.

Jännevoiman uudelleenankkuroitumispituus kasvoi mitä enemmän jännepunoksia vapautettiin, eli jännepunokset vaikuttivat vauriotilanteessa jossain määrin tukeutuvan viereisiin, vielä katkeamattomiin punoksiin. Odotetusti vajaan injektoinnin tyhjätila pidensi uudelleenankkuroitumispuutta, vaikka punokset olisivatkin kauttaaltaan injektointimassan ympäröimiä. Vaikutus selittyy mahdollisesti Hoyer-efektin aiheuttamalla punosten laajenemisella joka saa sementtipinnan ”korkkaamaan” tyhjätilaan.

Tutkimuksessa päästiin asetettuihin tavoitteisiin. Jännevoiman uudelleenankkuroitumispuuus saatiin määritettyä tavanomaista siltarakennetta vastaavassa tilanteessa. Lisäksi saatiin tietoa injektoinnin mahdollisten tyhjätilojen vaikutuksesta uudelleenankkuroitumiseen. Jatkotutkimuksia varten saatua tietoa uudelleenankkuroitumisesta voidaan käyttää hyväksi uudelleenankkuroitumisen laskennalliseen mallintamiseen, sekä jännepunoksen vauriotapauksessa vaikutusalueen pituuden arvioimiseen.



## LÄHTEET

- [1] Asp, Olli; Tulonen, Joonas. Jännepunosvaurion vaikutus betonisen sillan rakenteelliseen turvallisuuteen. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä nro/2017. Helsinki 2016. ISSN 1798-6664 (pdf).
- [2] Bond of reinforcement in concrete, fib Bulletin No. 10. fib. 2000. ISBN 978-2-88394-050-5.
- [3] Briere, Vincent; Kent A., Harries; Jarret, Kasan; Charles, Hager. Dilation behavior of seven-wire prestressing strand – The Hoyer effect. Construction and Building Materials. 2013, vol 40. P 650-658. ISSN 0950-0618.
- [4] Balta, Peter; Gjelsvik, Atle. Coefficient of Friction for Steel on Concrete at High Normal Stress. Journal of Materials in Civil Engineering. 1990 vol 2(1). P 46-49. ISSN 1943-5533 (online).
- [5] Broomfield, John P. Corrosion of Steel in Concrete. Abingdon, UK: Taylor & Francis, 2007. ISBN 9780415334044
- [6] SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu, osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen Standardisoimisliitto. 2015.
- [7] Model Code 2010 – Final draft, Volume 1, fib Bulletin No. 65. fib. 2012. ISBN 978-2-88394-105-2.